

## VSS オブザーバによるセミアクティブサスペンションの状態推定\*

外山 茂浩<sup>\*1</sup>, 横山 誠<sup>\*2</sup>, 愛田 一雄<sup>\*2</sup>

## State Estimation using VSS Observer for Semi-Active Suspensions

Shigehiro TOYAMA, Makoto YOKOYAMA<sup>\*3</sup>, Kazuo AIDA<sup>\*3</sup> Niigata University, 8050 Ikarashi 2-no-cho, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

In this paper, an observer design method is proposed for semiactive suspensions using VSS (Variable Structure System) theory, which provides a highly robust property against modeling errors and disturbances in the context of the matching conditions. The structure of the proposed observer is designed to be robust against the road variations which can be seen as nonstationary system disturbances. Although this structure basically requires to measure the actual damping force, it is estimated with a model of the damper. Therefore the influence of the estimation errors of the damping force on the state estimation is discussed in details, and the sufficient conditions for stability of the observer are given using Lyapunov theory. As a result, both the structure and design process of the proposed observer are simplified in comparison with existing ones. Numerical simulations illustrate not only the robust property of the proposed observer against the road variations but also a robust property against some unmatched modeling errors.

**Key Words:** Automobile, Semi-active Suspensions, Nonlinear Damper, Nonlinear Robust Observer  
Variable Structure System Theory

## 1. 緒 言

電子制御型サスペンションの中でも、フェイルセーフやエネルギー消費の観点で優れている減衰力制御型セミアクティブサスペンションの研究・開発が、近年盛んに行われてきている<sup>(1)~(4)</sup>。また、減衰力の切替えが数ミリ秒のオーダーで可能な電気粘性(ER)流体の減衰力可変ダンパ(以下、可変ダンパとする)への応用が試みられており<sup>(1)~(3)(5)(6)</sup>、それらが実現すれば今後より高度な制御則の適用が可能になると思われる。その一例としては、状態空間法に基づいた制御則が多く研究されるようになってきており、車体だけでなくタイヤに関する状態量をフィードバックすることでより望ましい性能を達成できるという報告がなされている<sup>(7)(8)</sup>。しかし、現実には測定困難な状態変数が存在したり、コストの制約からセンサを十分に用いることができないという問題があり、オブザーバの使用は不可避となっている。一方、セミアクティブサスペンションは一般に強い非線形特性を有しており、いくつか

の仮定をした場合でも拘束条件付きの双線形系となるため、そのオブザーバ設計は困難なものとなる。また、乗員数の変化によるばね上質量の増減や、作動油の温度依存性に伴う可変ダンパ特性の時変性、さらに、走行状況によって時々刻々とその特性が変化する路面変動がシステム外乱として存在するため、オブザーバには推定対象の不確かさに対する高いロバスト性が要求される。

セミアクティブサスペンションの状態推定オブザーバとして、これまでに、双線形系に対する外乱分離型オブザーバ<sup>(9)</sup>、ゲインスケジューリング型線形オブザーバ<sup>(10)</sup>などが提案されているが、前者を適用する場合は路面変動を観測しなければならない点が現実的でなく、複雑なパラメータ設定を経たこのオブザーバのパラメータ変動に対するロバスト性にも疑問が残る。また、後者はばね上の状態量に注目しており、たとえ、その手法をばね下の状態量の推定に応用したとしても、あらゆる路面状態に対応するゲインのチューニングが容易でないと思われる。

そこで、本論文では、推定対象のパラメータ変動や不確かさに対して高いロバスト性を有するVSS(可変構造系)オブザーバによるセミアクティブサスペンションの状態推定について検討する。VSSオブザーバ

\* 原稿受付 1999年5月10日。

<sup>\*1</sup> 正員, 新潟大学大学院 (〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。<sup>\*2</sup> 正員, 新潟大学工学部。

E-mail: m.yoko@eng.niigata-u.ac.jp

は種々考えられるが、ここでは路面状態の変動に対するロバスト性を主眼とし、構造が比較的簡単でかつ設計が容易なオブザーバを提案する。また、本オブザーバの漸近安定性に関する十分条件を与えるとともに、ダンパ特性と推定誤差の関係についても詳細に考察する。

以下、第2章では、セミアクティブサスペンションの単輪二自由度モデルに対して状態推定問題の定式化を行い、状態推定における問題点を明らかにする。第3章では、VSS オブザーバを提案し、第4章では数値シミュレーションによって、提案するVSS オブザーバの基本的な有効性を示す。そして最後に、第5章で本論文を総括する。

## 2. セミアクティブサスペンションの 状態推定

図1に示すように、推定対象であるセミアクティブサスペンションのモデルは、非線形特性を有する可変ダンパを用いた単輪二自由度モデルとする。路面変動を $d$ 、車体、タイヤの位置をそれぞれ $y_2, y_1$ とすると、このモデルは以下の運動方程式で表せる。

$$m_2 \ddot{y}_2 = -k_2 \Delta y_2 - f_d \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$m_1 \ddot{y}_1 = -k_1 \Delta y_1 + k_2 \Delta y_2 + f_d \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $f_d$ は可変ダンパから発生する減衰力を表し、その特性を以下のように表す。

$$f_d = f_0 + f_c \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$f_0 = c_0 \Delta \dot{y}_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$f_c = g(\Delta \dot{y}_2, u) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $f_0$ は制御入力 $u=0$ 時の減衰力を表している。また、 $f_c$ は制御入力によって可変な減衰力を表しており、制御入力 $u$ とサスペンションストローク速度 $\Delta \dot{y}_2$ に関して非線形性を有している。

ここで以下のように、状態変数 $X$ として車体上下速度、サスペンションストローク、タイヤ上下速度、タイヤ変位をとると、

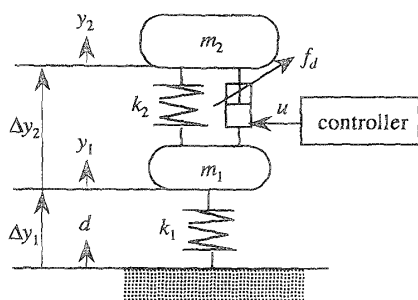


Fig. 1 Quarter car model with semiactive suspension

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [\dot{y}_2 \ \Delta y_2 \ \dot{y}_1 \ \Delta y_1]^T \quad \dots\dots\dots (6)$$

推定対象の状態空間モデルは次のように表せる。

$$\dot{X} = AX + Bf_c + G\dot{d} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$f_c = g(x_1 - x_3, u) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$$A = \begin{bmatrix} -c_0/m_2 & -k_2/m_2 & c_0/m_2 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ c_0/m_1 & k_2/m_1 & -c_0/m_1 & -k_1/m_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = [-1/m_2 \ 0 \ 1/m_1 \ 0]^T$$

$$G = [0 \ 0 \ 0 \ -1]^T$$

観測出力 $Y$ は、 $n(<4)$ 次元ベクトルとして、

$$Y = CX + Df_c, \quad Y \in R^n, \quad C \in R^{n \times 4}, \quad D \in R^{n \times 1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

と表す。以上の式に基づいたセミアクティブサスペンションとそのオブザーバの関係を図2に示す。

さて、ここでセミアクティブサスペンションの状態推定の問題点について考察する。まず、式(7)に示されるように、路面変動速度がシステム外乱として存在し、かつ、この外乱は高速道路走行時のように路面変動速度が白色雑音に近似されるような状況や、路面の段差や突起の乗り越え時など、その統計的性質が大きく変化する。したがって、たとえ減衰力 $f_c$ を測定できると仮定して線形最適オブザーバ(カルマンフィルタ)を用いるとしても、非定常システム外乱に対する最適化問題となり、設計は容易ではない。また、推定対象の状態空間モデル式(7)における右辺第2項の可変減衰力 $f_c$ が強い非線形性を有することによって、さらに状態推定は困難になる。可変減衰力 $f_c$ は、式(8)からわかるように制御入力 $u$ のみならず、状態変数の線形和として表されるサスペンションストローク速度に依存しているため、 $f_c$ が制御入力とサスペンションストローク速度それぞれに関して線形であると

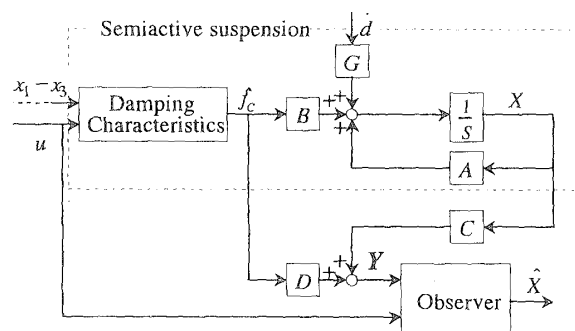


Fig. 2 Block diagram of state estimation for semiactive suspension

仮定した場合でも双線形項となる。その他、乗員の乗り降りに伴うばね上質量の変化、可変ダンパの減衰特性のモデル化誤差など、さまざまなモデルの不確かさに対するロバスト性が要求される。

そこで、以下では非定常な路面外乱に対するロバスト性を主眼に、ダンパの非線形モデルを用いて得られる推定減衰力を用いた VSS オブザーバを設計する。

### 3. VSS オブザーバの設計

一般的な VSS オブザーバに関しては、推定対象に存在する不確かな非線形成分の上界値さえわかれば、その非線形成分に対してロバストなオブザーバが設計できることが Walcott らによってすでに示されている<sup>(11)</sup>。この方法を直接的にセミアクティブサスペンションに適用することを考えると、推定対象式(7)の中で、右辺第 2, 3 項の可変減衰力と路面外乱速度が不確かさを有するため、これらに対して可変構造項を設計することになる。しかしこの場合、ダンパの非線形モデルを全く用いないため、不確かさの上限値は極めて大きくなり、チャタリングの問題を考えると有効な方法とはいえない。そこで、ここではダンパの非線形モデルを用いて減衰力を推定し、路面外乱速度のみを不確かな成分として考える。そして、減衰力の推定誤差に関して考察し、オブザーバの漸近安定性に関する十分条件を示す。以上の設計方針に従い、以下に示す VSS オブザーバを提案する(図 3)。

$$\dot{\hat{X}} = A_0 \hat{X} + (B - KD) \hat{f}_c + KY + S(\hat{X}, Y, \rho) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\hat{f}_c = \hat{g}(\hat{x}_1 - \hat{x}_3, u) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\hat{Y} = C\hat{X} + D\hat{f}_c \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、観測出力は  $(C, A)$  が可観測となるように選択し、

$$A_0 = A - KC \quad \dots\dots\dots (13)$$

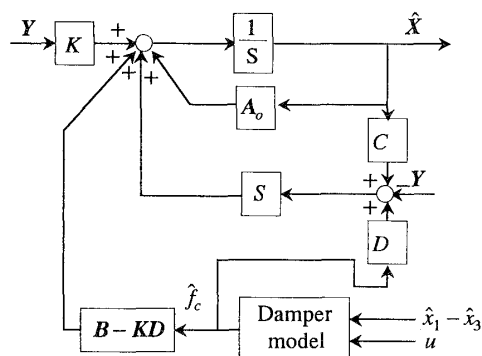


Fig. 3 Block diagram of VSS observer

$$S(\hat{X}, Y, \rho) = \begin{cases} -G \frac{\sigma}{\|\sigma\|} \rho & \text{if } \sigma \neq 0 \\ 0 & \text{if } \sigma = 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\sigma = H(\hat{Y} - Y) \quad \dots\dots\dots (15)$$

である。ゲイン行列  $K$ 、可変構造項  $S(\hat{X}, Y, \rho)$  の各パラメータは、以下の条件を満たすように設計する。

(1)  $A_0$  が安定固有値を持つ。

(2) ある正定対称行列  $Q$  が存在し、行列  $H$  が次式を満たす。

$$C^T H^T = P G \quad \dots\dots\dots (16)$$

ただし、 $P$  は次のリアプノフ方程式の正定対称な唯一解である。

$$A_0^T P + P A_0 = -Q \quad \dots\dots\dots (17)$$

(3) スカラ関数  $\rho$  が次の条件を満たす。

$$\rho \geq \|d\| \quad \dots\dots\dots (18)$$

このとき、推定誤差  $e = \hat{X} - X$  のダイナミクスは、

$$\dot{e} = A_0 e + (B - KD)(\hat{f}_c - f_c) - G\dot{d} + S(\hat{X}, Y, \rho) \quad \dots\dots\dots (19)$$

となる。ここで、上式第 2 項に表される減衰力の推定誤差が状態変数の推定に及ぼす影響を考えなければならない。そこで、まず分散系 ER ダンパを用いた場合を例に、推定誤差の漸近安定性について考察する。分散系 ER ダンパの減衰特性は、ビンガム流体としての特性を示すことが知られているが、その減衰特性モデルを、固定減衰の粘性ダンパと電圧によって摩擦力が変化できるクーロン摩擦ダンパとして考えると<sup>(5)(6)</sup>、式(8)の減衰力と制御入力、サスペンションストローク速度間の関係は以下の式で表すことができる(図 4)。

$$f_c = g_{er}(u) \cdot \text{sgn}(x_1 - x_3) \quad \dots\dots\dots (20)$$

このように、この減衰特性モデルでは、減衰力の絶対値およびその符号は、それぞれ電圧およびサスペンションストローク速度によって決まるため、サスペンションストローク速度の推定誤差があったとしても、その符号が一致していれば精度のよい減衰力の推定が期待できる(図 5)。したがってこのとき、式(19)は、

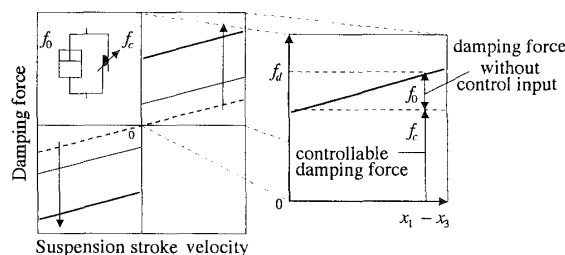


Fig. 4 Characteristics of ER damper

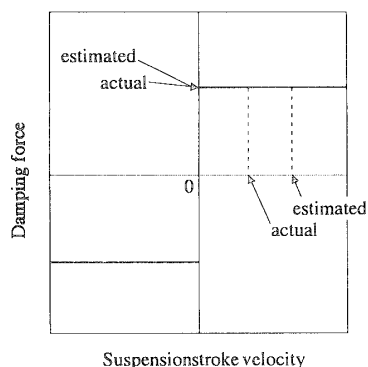


Fig. 5 Damper model

$$\dot{e} = A_0 e - G \dot{d} + S(\hat{X}, Y, \rho) \quad (21)$$

と考えることができる。そこで、 $e$ に関するリアプノフ関数の候補を次のように選ぶと、

$$V = e^T P e \quad (22)$$

その時間微分は、

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T (A_0^T P + P A_0) e - 2 \frac{e^T P B H C e}{\|H C e\|} \rho - 2 e^T P G \dot{d} \\ &= -e^T Q e - 2 \|H C e\| \rho - 2 e^T C^T H^T \dot{d} \quad (23) \\ &\leq -e^T Q e - 2 \|H C e\| \rho + 2 \|H C e\| \rho \\ &= -e^T Q e < 0 \end{aligned}$$

となり、リアプノフの安定理論より推定誤差  $e$  は漸近安定となる。しかし、現実の可変ダンパには、走行状況の変化によって減衰特性の摂動や切り換えの遅れなど、モデル化誤差が存在し、減衰力の推定誤差が無視できない場合が多い。このとき、リアプノフ関数の候補を先ほどと同様に式(22)とすると、その時間微分は次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T (A_0^T P + P A_0) e - 2 \frac{e^T P B H C e}{\|H C e\|} \rho \\ &\quad - 2 e^T P G \dot{d} - 2 e^T P (B - K D) (\hat{f}_c - f_c) \quad (24) \\ &< -e^T Q e + 2 \|P (B - K D)\| \|e\| \|\hat{f}_c - f_c\| \\ &< -\lambda_{\min}(Q) \|e\|^2 + 2 \|P (B - K D)\| \|e\| \|\hat{f}_c - f_c\| \end{aligned}$$

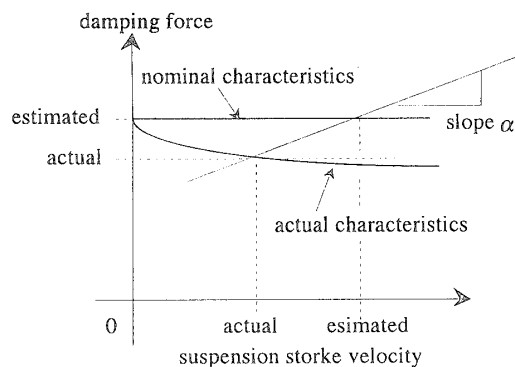
ここで、 $\lambda_{\min}(Q)$  は行列  $Q$  の最小固有値を表している。さてここで、減衰力の推定誤差の絶対値に関して、サスペンションストローク速度の推定誤差に対する感度  $\alpha$  を用いると、次の関係式を得る。

$$\begin{aligned} |\hat{f}_c - f_c| &= \alpha |e_1 - e_3| \\ &= \alpha [1 \ 0 \ -1 \ 0] e < \alpha \sqrt{2} \|e\| \quad (25) \end{aligned}$$

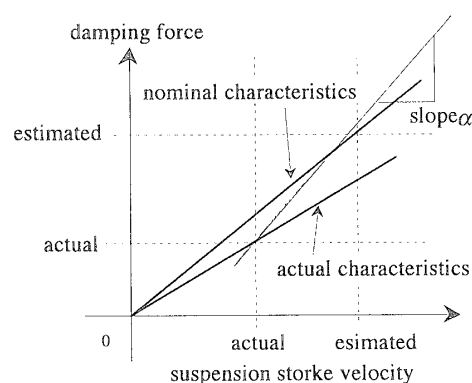
したがって、 $\dot{V}$  が負となるためには、新たに次の十分条件を満足すればよいことがわかる。

$$0 < \alpha < \frac{\sqrt{2} \lambda_{\min}(Q)}{4 \|P (B - K D)\|} \quad (26)$$

このことから、可変オリフィス型ダンパのようにニュートン流体的な減衰特性を有する可変ダンパよりも、



(a) ER damper



(b) Variable orifice damper

Fig. 6 Sensitivity of damping force estimation errors to suspension stroke velocity estimation errors

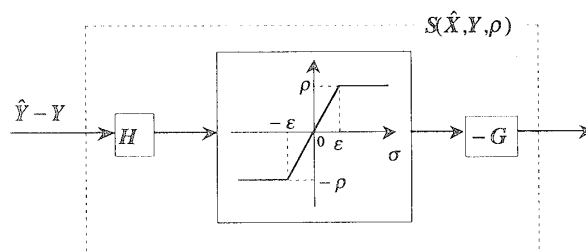


Fig. 7 Saturation function

ビンガム流体的減衰特性を有するERダンパのほうが感度  $\alpha$  の値が小さく(図6)、より大きな可変ダンパのモデル化誤差を許容できると考えられる。言い換えると、ビンガム流体的減衰特性を有する可変ダンパを用いた方が、設計の自由度は高まる。

さて、このVSSオブザーバは、式(10)からわかるように、右辺第1項から第3項までが線形オブザーバの形で、第4項の可変構造項を加えることで、いわゆるマッチング条件によって路面変動速度に対するロバスト性を得ている。しかし、実際には切り換え遅れや観測雑音の影響などによるチャタリングの問題が発生する。したがって、式(14)で表される可変構造項を次式のように飽和関数を用いた形に変更する(図7)。

$$S(\hat{X}, Y, \rho) = \begin{cases} -G \frac{\sigma}{\|\sigma\|} \rho & \text{if } \|\sigma\| \geq \varepsilon \\ -G \frac{\sigma}{\varepsilon} \rho & \text{if } \|\sigma\| < \varepsilon \end{cases} \quad \dots\dots\dots (27)$$

この場合、 $\sigma=0$  の近傍における可変構造項はハイゲイン線形フィードバックになると考えられる。したがって、区間  $[-\varepsilon, \varepsilon]$  での推定誤差  $e$  のダイナミクスは、

$$\dot{e} = A_0 e + \frac{\rho}{\varepsilon} G H C e = \left\{ A - \left( K - \frac{\rho}{\varepsilon} G H \right) C \right\} e \quad \dots\dots\dots (28)$$

と表すことができるので、線形オブザーバと同様に極配置などから VSS オブザーバの雑音に対する特性、漸近特性などを検討することができる。4 章のシミュレーションで具体的な考察の一例を示す。

#### 4. 数値シミュレーション

本章では、提案した VSS オブザーバの基本的な有効性を検証した数値シミュレーションの結果を示す。シミュレーションに用いた単輪 2 自由度モデルの各パラメータは以下のように設定し、図 8 のような減衰特性を有する ER ダンパを仮定した。また、サンプリングタイムは 1 ms とした。

$$m_2 = 350 \text{ kg}, \quad k_2 = 23\,300 \text{ N/m}$$

$$m_1 = 35 \text{ kg}, \quad k_1 = 233\,000 \text{ N/m}$$

観測出力は、観測雑音を含んだ車体上下加速度とタイヤ上下加速度とし、制御則は次に示すフィードバックゲインを用いた線形最適状態フィードバックとした。

$$F = \begin{bmatrix} -9.96 \times 10^3 & -2.15 \times 10^{-2} & 1.78 \times 10^2 \\ 6.08 \times 10^3 \end{bmatrix}$$

VSS オブザーバの設計では、まず可変構造項を無視し、路面変動速度がカットオフ振動数 30 Hz のローパ

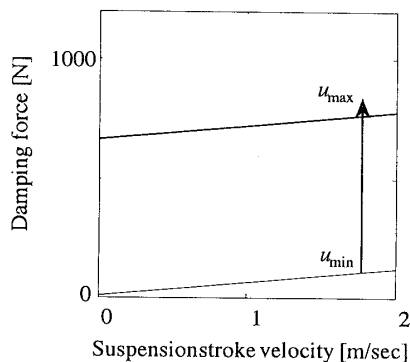


Fig. 8 Characteristics of ER damper for numerical simulations

スフィルタを通過させた白色正規性信号、観測値に SN 比 0.02 の観測雑音が存在するとしてカルマンフィルタを構成するよう、式(10)のオブザーバゲイン  $K$  を以下のように決定した。

$$K = \begin{bmatrix} 0.154\,6 & -0.685\,0 & 22.020\,3 \\ -0.013\,0 & 0.006\,3 & 0.154\,6 \\ 0.026\,3 \\ -0.016\,6 \end{bmatrix}^T$$

次に、可変構造項の設計においては、式(23)の  $\rho$  はオブザーバゲインの決定の際に想定した  $\dot{d}$  の上界値を基に、また、式(23)中の  $H$  は条件(2)を満足するよう計算から以下のように決定した。

$$\rho = 0.76$$

$$H = [-9 \quad -0.1]$$

さらに、式(23)中の飽和関数に関するパラメータ  $\varepsilon$  はシミュレーションを通して、

$$\varepsilon = 8$$

と決定した。シミュレーションでは、VSS オブザーバ式(10)の第 4 項の可変構造項を加えない線形オブザーバと、VSS オブザーバとの推定精度の比較を行った。ただし、この線形オブザーバは減衰力  $f_c$  を測定していることに注意されたい。すなわち、定常線形オブザーバを用いる場合は、減衰力を測定するか、あるいは、ダンパの粘性係数を一定と仮定しなければ設計

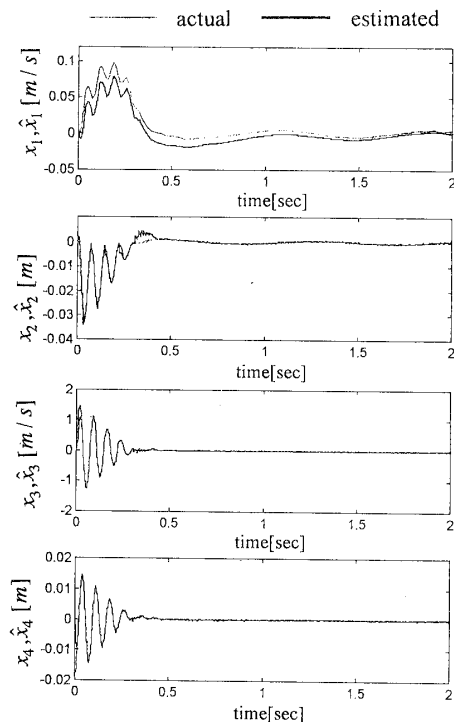


Fig. 9 Estimation results for linear observer, road variation: step function (2 cm)

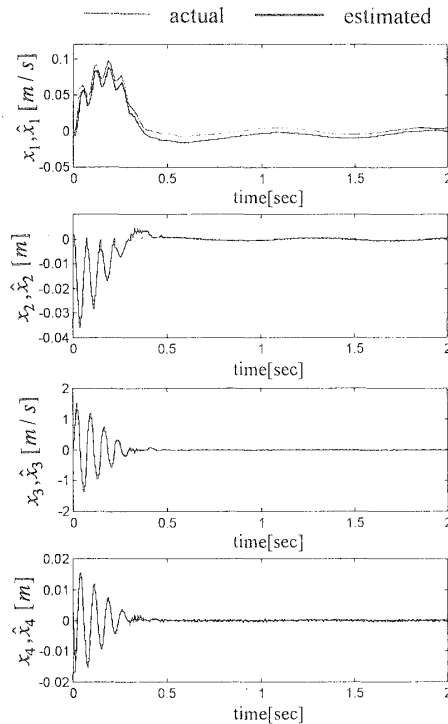


Fig. 10 Estimation results for VSS observer, road variation: step function (2 cm)

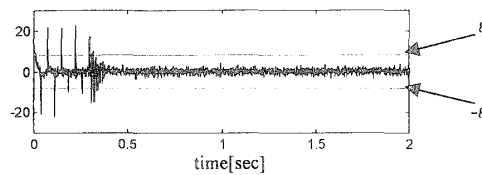


Fig. 11 Switching function

できない。ここで用いた線形オブザーバは前者に相当するが、コストの観点から提案するオブザーバより劣るといえる。また、後者は明らかに大きな推定誤差を含むことになる<sup>(10)</sup>。

まず、路面変動を高さ 2 cm のステップ関数とした時の線形オブザーバによる推定結果を図 9 に、VSS オブザーバによる推定結果を図 10 に示す。これらの図から、減衰力を測定している線形オブザーバと比べても、VSS オブザーバによる推定は、非常に良好な推定結果が得られていることがわかる。線形オブザーバは前述の仮定の下で最適化されているが、ステップ状路面変動には必ずしも最適化されていないことに留意されたい。一方、VSS オブザーバでは、図 11 に示すように、切関数  $\sigma$  が微小区間  $[-\epsilon, \epsilon]$  で変動しつづけていることから、擬似的スライディングモードが発生し、マッチング条件によって路面変動の影響をほとんど受けていない。より厳密には、3 章で述べたようにハイゲイン線形フィードバックと考えることがで

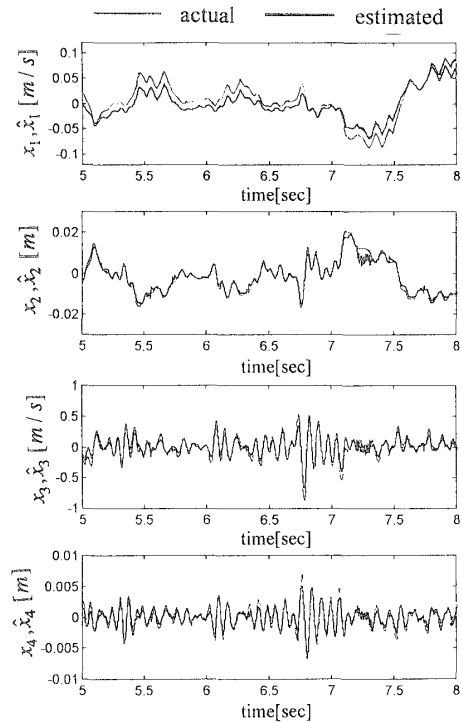


Fig. 12 Estimation results for linear observer, road variation velocity: band limited white process with bandwidth of 10 Hz

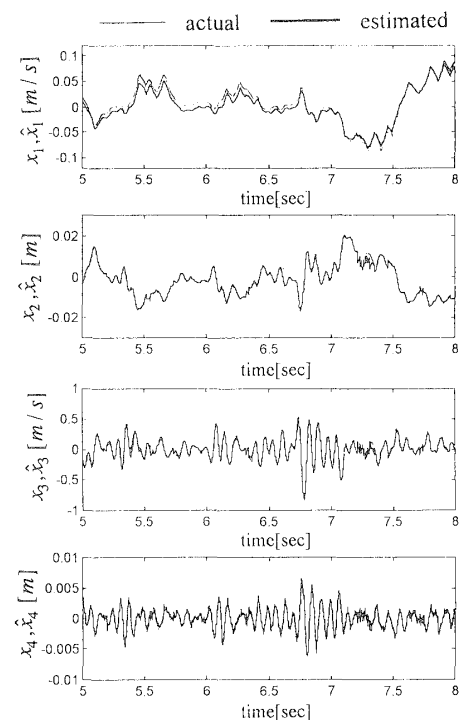


Fig. 13 Estimation results for VSS observer, road variation velocity: band limited white process with bandwidth of 10 Hz

き, 極は,

$$-0.5866, -121.1259,$$

$$-53.5600 \pm 58.0424i$$

となっている。一方, 減衰力を測定した線形オブザーバの極は, 次のようになっている。

$$-1.3102, -45.3381, -59.4707 \pm 62.6412i$$

これより, VSS オブザーバでは, 代表特性根の絶対値が線形オブザーバのそれより小さく, このため誤差の減衰特性は若干遅くなっていることがわかる。

次に, 路面変動速度をカットオフ周波数 10 Hz のバターワースフィルタを通過させた白色正規性信号とした時の線形オブザーバによる推定結果を図 12 に, VSS オブザーバによる推定結果を図 13 に示す。この条件では, 線形オブザーバはステップ状路面変動の場合と同様最適化されておらず, 特に車体上下速度がばね上固有振動数周辺の真値に対して振幅が小さく推定されていることがわかる。したがって, ばね上モードの推定精度を向上させるには, 路面変動に対応したゲインの調整, つまりゲインスケジューリングが必要となってくる。一方, VSS オブザーバはマッチング条件によって, 路面変動の統計的性質の変化に対してロバストな状態推定が可能であることがわかる。

最後にマッチング条件を満たさないパラメータ変動やモデル化誤差に対する VSS オブザーバのロバスト

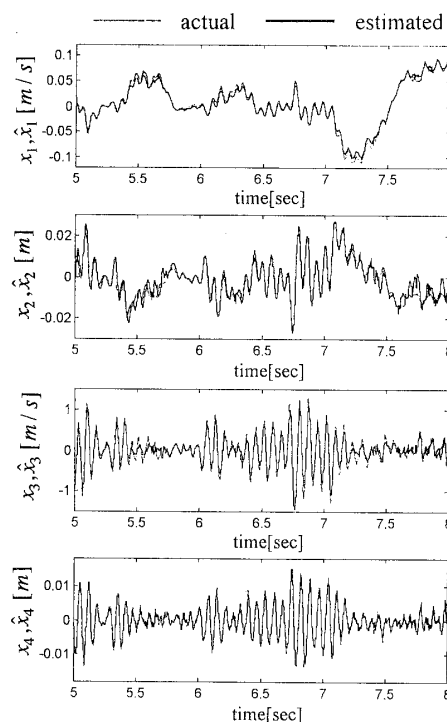


Fig. 15 Estimation results for VSS observer, modeling error for damper: first order system ( $T=0.01$  s)

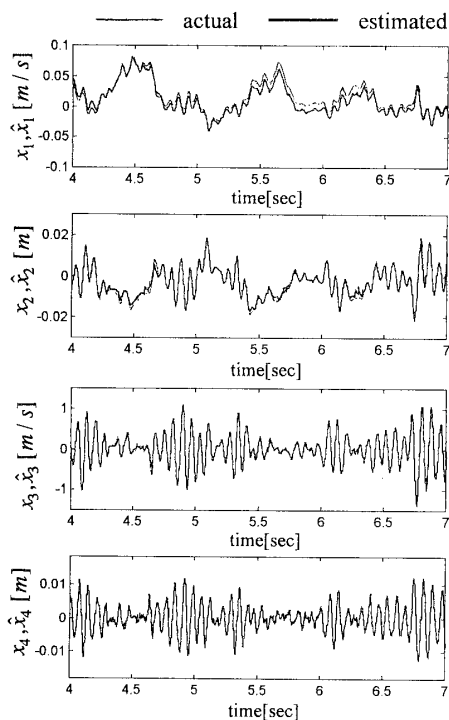


Fig. 14 Estimation results for VSS observer, sprung mass variation: 350 → 410 kg

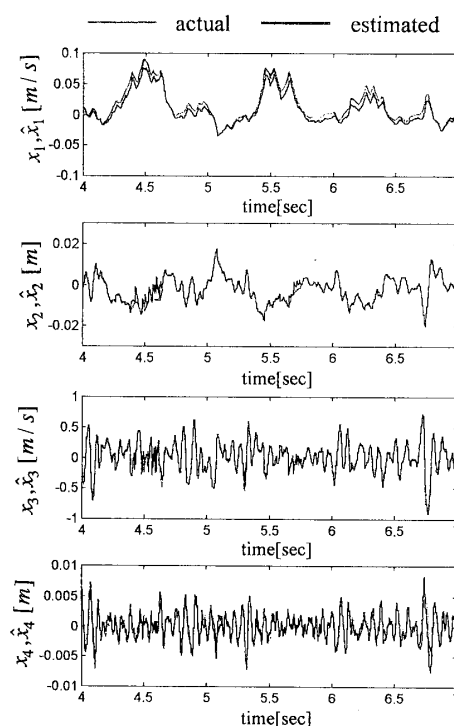


Fig. 16 Estimation results for VSS observer, modeling error for tire: damping ( $\zeta=0.2$ )

性を検証した。まず、乗員数の変化に伴うばね上質量の変化に対する VSS オブザーバのロバスト性を検証するために、ばね上質量をノミナル値の 350 kg から 410 kg としたときの推定結果を図 14 に示す。次に、可変ダンパの減衰特性のモデル化誤差に対するロバスト性を検証するために、可変ダンパの減衰特性に時定数 10 ms の一次遅れ要素を付加したときの推定結果を図 15 に示す。そして、タイヤのモデル化誤差に対するロバスト性を検証するために、減衰比 0.2 の減衰要素をばね下モデルに付加したときの推定結果を図 16 に示す。これらの結果から、VSS オブザーバは、現実的に起こりうるマッチング条件を満たさないパラメータ変動に対しても良好な推定性能を保持しており、チャタリングの問題や設計の簡単化を理由に可変構造項を複雑にしないという VSS オブザーバの設計指針の妥当性を確認できた。

## 5. 結 言

本論文では、VSS 理論を用いて路面変動に対して高いロバスト性を有するセミアクティブサスペンションのオブザーバを提案した。本オブザーバは、路面変動速度の上界値さえわかれば設計でき、従来の方法に比べて設計が容易である。そして、数値シミュレーシ

ョンによって、理論の妥当性を示すとともに、可変ダンパの特性やばね上質量などにマッチング条件を満たさない不確かさが存在した場合でも、良好な推定精度を有することを確認した。本オブザーバを基礎に、上述のマッチング条件を満たさない不確かさに対するロバスト性の理論的解析と更なる高ロバスト化を検討中である。

## 文 献

- (1) 久保康丸, シンポジウム第 5 回「運動と振動の制御」講演論文集, (1997), 345-348.
- (2) 伊藤正剛・前森健一, 機論, **64**-619, C(1998), 767-771.
- (3) 吉田秀久・永井正夫, 機論, **64**-625, C(1998), 172-178.
- (4) Yokoyama, M. and Toyama, S., *Proc. 3rd Int. Conf. MOVIC*, Vol. 3 (1996), 333-338.
- (5) 中野政身・米川琢哉, 機論, **62**-593, C(1996), 33-40.
- (6) 古荘純次・坂口正道, トライボロジスト, **41**-6, (1996) 512-517.
- (7) Yi, K. and Hedrick, K., *Trans. ASME, J. Dynamics, Measure. Cont.*, 115 (1993), 465-474.
- (8) M. A. H. VAN DER AA, ほか 2 名, *Vehicle System Dynamics*, 28 (1997), 307-323.
- (9) Hac, A., *Trans. ASME, Dynamic. Sys., Measure. Cont.*, 114 (1992) 556-562.
- (10) 中井英雄・ほか 3 名, 機論, **63**-615, C(1997), 202-208.
- (11) B. L. Walcott and Zak, S. H., *IEEE Trans. on Auto. Cont.*, AC-32-2 (1987) 166-170.