

スライディングモード理論による道路橋交通振動の制御

岡 林 隆 敏*・加 賀 敏 明**

Highway Bridge Traffic Vibration Control by Sliding Mode Control Theory

by

Takatoshi OKABAYASHI*, Toshiaki KAGA**

The linear quadratic regulator theory is applied for the active control of bridge vibration conducted by traffic loads. As the bridge-vehicle system is to be the time varying system, the stationary LQR control is not optimal control for the bridge vibration. This study concerned with the control of bridge vibration under a moving vehicle using by the sliding mode theory. The effectiveness of sliding mode theory are discussed by the numerical simulation for active and hybrid control.

1. はじめに

近年、都市高速道路周辺において、橋梁振動による交通振動障害が発生し問題となっている。これは、車両が走行することにより、橋桁の振動が励起され、これが橋脚、地盤を伝わり建築物等が共振し、周辺住民に不快感を与えるものである。この対策として、動吸振器を用いるパッシブ制御が検討されてきた。橋梁系は、振動特性が時間と共に変化する時変系となる。そこで、橋桁に直接、制御力を加えるアクティブ制御^{1) 2)}が注目されることとなり、さらに、パッシブ制御の効果を合わせ持ったハイブリッド制御^{3) 4)}の適用が提案されている。

交通荷重による道路橋の振動問題においては、橋梁の見かけ上の固有振動数は時間的に変化する。パラメータ変動を伴う時変系となる⁵⁾。また、路面凹凸上を車両が走行することで発生する外乱は、不確かさを有する未知外乱⁶⁾となり、これが持続的に橋梁に作用することになる。しかし、従来、道路橋振動に適用された制御則は、最適レギュレータ理論であり、定常系で確定的な外力を扱ったものである。道路橋交通振動では、車両台数、車種の変動、走行速度など不確定な要因があり、これを取り込んだ制御が必要になる。そこ

で、これらの変動に対して、頑強（ロバスト）な制御が望まれる。本研究では、橋梁系で問題となるパラメータ変動を伴う時変系、および不確かさを含む未知外乱に対し、優れたロバスト性を有するスライディングモード理論^{5) 6) 7) 8) 9)}を橋梁振動のアクティブ制御とハイブリッド制御に適用した。

スライディングモード理論は、位相平面に切換線を指定し、応答をこの線にスライドさせる斬新な制御則である。近年のパーソナルコンピュータ、DSP等¹⁰⁾の著しい発達により制御入力のスウィッチングが容易となり、制御工学の分野で注目されることとなった。スライディングモード理論では、マッチング条件を満足することで、モデル化誤差や外乱の変動をまったく受けない不変性を有することになる。このため、非線形系、パラメータ変動系、時変系、未知パラメータ系、未知外乱などに優れたロバスト性を有し、建築構造物をはじめ、弾性ロータ、車両用ブレーキシステム、さらに宇宙ロボット等に適用されている^{6) 11) 12) 13) 14) 15) 16)}。

本論文では、このような特徴を有するスライディングモード理論を、時変系で未知外乱が作用する道路橋振動に適用し、その有効性について検討する。

平成8年3月26日受理

*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

**大学院海洋生産科学研究科海洋生産開発学専攻 (Graduate School of Marine Science and Engineering)

そこで、まず、複雑な連性振動となる橋梁-車両-動吸振器系のモデル化を行う。橋梁は、3次振動までを制御対象とし、車両は1自由度系でモデル化する。このシステムの振動制御方法にアクティブ制御およびハイブリッド制御を適用する。次に、それぞれに対して、全状態量をフィードバックした場合と車両以外の状態量をフィードバックした場合について考える。これらの系に対して、スライディングモード理論を適用する。さらに、一般的なスライディングモード理論を適用すると、制御入力に激しく変動するチャタリング現象がみられるので、その防止法を検討する。以上の場合について、スライディングモード理論による制御の有効性を確認するため、数値シミュレーションにより最適レギュレータ理論による制御との比較を行う。

2. 橋梁-車両系振動の制御方法

(1) アクティブ制御

橋梁-車両系振動のアクティブ制御は、図-1のモデルで考える。路面凹凸を含む橋梁上を1自由度のバネ質点系でモデル化された単一車両が一定速度 v で走行するとき、橋梁の $x=b$ 点にアクチュエータを設置しアクティブ制御を行う。制御入力 $u(t)$ を加え、橋梁振動を n 次まで考えた場合、橋梁 x 点における変位応答、基準座標、および車両の方程式は、次式で与えられる。

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^n \phi_k(x) q_k(t) \quad (1)$$

$$\ddot{q}_k(t) + 2h_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = -\mu_{kz} \phi_k(vt) \ddot{z}(t) + \phi_k(b) u(t) / m_k \quad (2)$$

$$\ddot{z}(t) + 2h_o \omega_o \{\dot{z}(t) - \dot{y}(vt, t) - \dot{r}(t)\} + \omega_o^2 \{z(t) - y(vt, t) - r(t)\} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $y(x, t)$: x 点の橋梁の変位応答、 $\phi_k(x)$: k 次の振動モード、 $q_k(t)$: k 次の基準座標、 $z(t)$: 車両の垂直変位、 $\omega_k, \omega_o, h_k, h_o$: それぞれ、橋梁、および車両の円固有振動数と減衰定数、 μ_{kz} : 橋梁の k 次の有効質量 m_k に対する車両の質量 m_o との質量比、 $r(t)$: 路面凹凸、 v : 車両の速度、 $u(t)$: 制御入力である。

橋梁を3次振動まで考慮し、以下のような状態量を導入する。

$$\mathbf{q}(t) = [q_1(t) \ q_2(t) \ q_3(t)]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_a(t) = [\mathbf{q}(t)^T \ \dot{\mathbf{q}}(t)^T \ z(t) \ \dot{z}(t)]^T \quad (5)$$

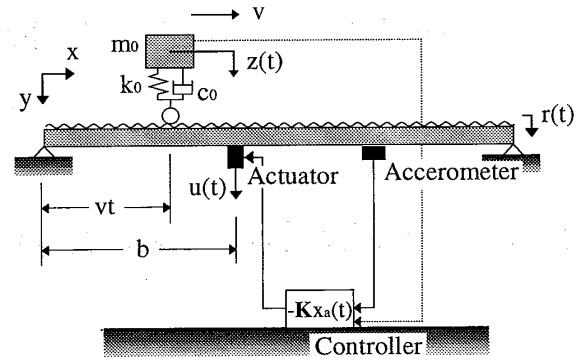


Fig. 1 Active control of bridge vibration

車両から観測された路面凹凸の変位を $r(t)$ 、その時間微分を $\dot{r}(t)$ で表すと、路面凹凸の変数ベクトルは次のように定義できる。

$$\mathbf{r}(t) = [r(t) \ \dot{r}(t)]^T \quad (6)$$

これらの式を用いると、(2)(3)式は、次の状態方程式で記述することができる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_a(t) &= \mathbf{A}_a(t) \mathbf{x}_a(t) + \mathbf{D}_a(t) \mathbf{r}(t) + \mathbf{B}_a(t) u(t) \\ \mathbf{x}_a(t_0) &= \mathbf{x}_{a0} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{A}_a(t)$: 橋梁-車両系の係数マトリックス、 $\mathbf{D}_a(t)$: 外力に係わるマトリックス、 $\mathbf{B}_a(t)$: 制御入力に係わるマトリックスである。

(2) ハイブリッド制御

橋梁-車両系振動のハイブリッド制御は、図-2のモデルで考える。橋梁、車両および動吸振器の方程式は、次式で与えられる。

$$\ddot{q}_k(t) + 2h_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = -\mu_{kz} \phi_k(vt) \ddot{z}(t) - \mu_{kd} \phi_k(b) \ddot{d}(t) \quad (8)$$

$$\ddot{z}(t) + 2h_o \omega_o \{\dot{z}(t) - \dot{y}(vt, t) - \dot{r}(t)\} + \omega_o^2 \{z(t) - y(vt, t) - r(t)\} = 0 \quad (9)$$

$$\ddot{d}(t) + 2h_d \omega_d \{\dot{d}(t) - \dot{y}(b, t)\} + \omega_d^2 \{d(t) - y(b, t)\} = u(t) / m_d \quad (10)$$

ここで、 $d(t)$: 動吸振器の変位、 ω_d, h_d : 動吸振の円固有振動数と減衰定数、 μ_{kd} : 橋梁の k 次の有効質量 m_k に対する動吸振器の質量 m_d との質量比である。その他の文字については、アクティブ制御の(1)(2)(3)式で定義した通りである。

なお、動吸振器のパラメータ ω_d, h_d の最適設計には、 H_{max} 法¹⁷⁾ を用いた。これは、橋梁に動吸振器を設置

した場合、橋梁振動の周波数伝達関数の最大値を最小化する設計法である。

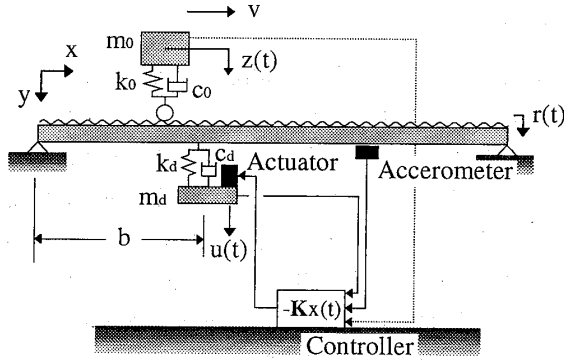


Fig. 2 Hybrid control of bridge vibration

動吸振器の変数を含む状態変数を、以下のように定義する。

$$\mathbf{q}(t) = [q_1(t) \ q_2(t) \ q_3(t)]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{q}(t)^T \ \dot{\mathbf{q}}(t)^T \ d(t) \ \dot{d}(t) \ z(t) \ \dot{z}(t)]^T \quad (12)$$

(6)式で定義した路面凹凸の変数ベクトル $\mathbf{r}(t)$ を用いると、(8)(9)(10)式は、次の状態方程式で記述することができる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{r}(t) + \mathbf{B}(t)u(t) \\ \mathbf{x}(t_0) &= \mathbf{x}_0 \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 $\mathbf{A}(t)$:橋梁-車両-動吸振器系の係数マトリックス、 $\mathbf{D}(t)$:外力に係わるマトリックス、 $\mathbf{B}(t)$:制御入力に係わるマトリックスである。

(3) 路面凹凸のモデル化

車両が橋梁上を走行した場合、外乱発生の原因となる(6)式の路面凹凸の変数ベクトル $\mathbf{r}(t)$ の各要素は、特定のパワースペクトル密度を有する正規確率過程でモデル化できる¹⁸⁾。

$x=vt$ で変換した、路面凹凸のパワースペクトル密度は、次式で近似される。

$$S_r(\omega) = S_0(\omega^2 + \beta^2) \quad (14)$$

ここで、 $S_0 = 2\pi vA$, $\beta = 2\pi va$, $A = 1.0 \times 10^{-3}$ (cm^2/m), $a = 0.05$ である。

(14)式で近似した、名阪高速道路の路面凹凸のパワースペクトル密度を図-3に示す。後で述べる本論文の数値シミュレーションではこれを用いた。

このパワースペクトル密度より、路面凹凸の変位 $r(t)$ および時間微分 $\dot{r}(t)$ は次のような三角級数モデルにより合成できる。

$$r(t) = \sum_{k=1}^m a_k \sin(\omega_k t + \phi_k) \quad (15)$$

$$\dot{r}(t) = \sum_{k=1}^m \omega_k a_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \sigma_k^2 &= 4S_r(\omega) \cdot \Delta\omega \\ \omega_k &= \omega_L + (k-1/2) \Delta\omega, \Delta\omega = (\omega_U - \omega_L)/m \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、 a_k :平均値0、標準偏差 σ_k を有する正規乱数、 ϕ_k : $0 \sim 2\pi$ の一様乱数、 ω_L , ω_U :合成する波形の凹凸数の下限と上限、 m :周波数の分割数である。

(15)(17)式により合成した路面凹凸の変位 $r(t)$ の例を図-4に示す。

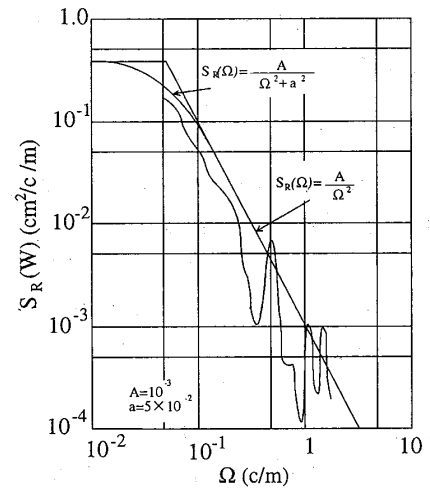


Fig. 3 Power spectral density of road roughness

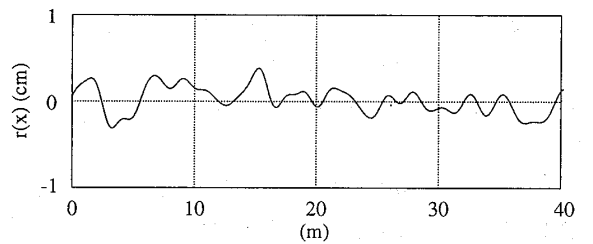


Fig. 4 Road roughness

3. 制御理論

(1) 最適レギュレータ理論

スライディングモード理論と最適レギュレータ理論による制振効果の違いを比較するため、これらを橋梁系振動のハイブリッド制御に適用した場合の定式化を行う。

まず、最適レギュレータ理論について述べる。本研究では、フィードバックゲインが時間的に変化しない定常最適レギュレータ理論で考える。(13)式における制御

入力 $u(t)$ の最適な値は、次の二次形式評価関数を最小にするものとして選ばれる。

$$J = \int_0^\infty [\mathbf{x}(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + u(t)^T \mathbf{R} u(t)] dt \quad (18)$$

ここで、 \mathbf{Q} と \mathbf{R} は、重み行列で、それぞれ非負定値と正定値で構成された正方対称行列である。

この評価関数を最小にする最適制御入力 $u(t)$ は、次式のようになる。

$$u(t) = -\mathbf{K}_r \mathbf{x}(t) \quad (19)$$

この式の最適フィードバックゲインベクトル \mathbf{K}_r は、

$$\mathbf{K}_r = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (20)$$

で与えられる。この式のマトリックス \mathbf{P} は、次の定常リカッチ方程式より求められる。

$$\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (21)$$

ここで、 \mathbf{A} および \mathbf{B} は、車両が橋梁中点に達した時刻 $t = L/2v$ における値を用いる。

最適レギュレータ理論をアクティブ制御に適用した場合には、(18)(19)式の $\mathbf{x}(t)$ および(20)(21)式の \mathbf{A} 、 \mathbf{B} は、(7)式より求めた $\mathbf{x}_a(t)$ 、 \mathbf{A}_a 、および \mathbf{B}_a になる。

(2) スライディングモード理論

スライディングモード理論は、位相平面に切換線を指定し、応答をこの線上に拘束しスライドさせる可変構造制御理論であり、非線形系、パラメータ変動系、時変系、未知外乱などに優れたロバスト性を有する⁶⁾。本研究では、橋梁系がパラメータ変動を伴う時変系となり、未知外乱が問題となるため、これに対しロバスト性をもつスライディングモード理論を適用する。

ハイブリッド制御において、この理論の特徴である制御入力の切り換えを行う際の条件を与える切換関数 σ は、(13)式で $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ と置き換えると次式で表現できる。

$$\sigma = \mathbf{S} \mathbf{x} \quad (22)$$

この式のベクトル \mathbf{S} を決定することで、各次振動数の切換超平面の傾きが設計できる。これに関しては、極配置法、 H^2 理論、 H^∞ 理論、 μ シンセシス等、いくつかの方法が検討されているが^{6) 12)}、本研究では、最適レギュレータ理論との制御効果の比較を行うため、最適レギュレータ理論で用いる定常リカッチ方程式による \mathbf{S} の決定方を採用し、両理論での重み行列 \mathbf{R} 、 \mathbf{Q} の値を統一する。

(21)式の定常リカッチ方程式の解 \mathbf{P} より、ベクトル \mathbf{S} は次式のように求まる。

$$\mathbf{S} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (23)$$

次に、橋梁の変位応答を切換超平面に到達させ交線上でスライドさせることにより、スライディングモードを実現するための条件を考える。この方法にもいくつかの提案がなされているが⁶⁾、有限時間において応答を切換超平面に到達させること目的とし、切換関数 σ に対するリアプノフ関数 V を定義し、これより求められる微分値 \dot{V} を負とする方法を採用する。

σ に対するリアプノフ関数 V は、

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (24)$$

で与えられ、状態フィードバックの制御入力を $-\mathbf{K} \mathbf{x}$ とすると、スライディングモードの実現条件は、

$$\dot{V} = \sigma \mathbf{S} \mathbf{A} \mathbf{x} - \sigma \mathbf{S} \mathbf{B} \mathbf{K} \mathbf{x} < 0 \quad (25)$$

となる。これより、フィードバックゲインベクトル \mathbf{K} の各要素は次式のように切り換え、変動させることになる。

$$k_j = \begin{cases} k_j^+ > (\mathbf{S} \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{S} \mathbf{A})_j \sigma x_j > 0 \\ k_j^- < (\mathbf{S} \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{S} \mathbf{A})_j \sigma x_j < 0 \end{cases} \quad (j=1, \dots, 10) \quad (26)$$

ここで、 $(\mathbf{S} \mathbf{A})_j$ は、 $(\mathbf{S} \mathbf{A})$ の j 列の成分である。

この式で、 k_j^+ および k_j^- をどの程度に変動させれば最も効果的かについては、いまのところ理論的確立はなされていない¹¹⁾。本研究では、試行錯誤によりその割合を $(\mathbf{S} \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{S} \mathbf{A})_j$ の80%とした。

一般のスライディングモード理論では、非線形性を有する制御入力が、無限大の切換周波数を持つことになり、チャタリングとよばれる高周波振動をひきおこす。アクチュエータの性能上このような力を発生させることは、事実上、不可能である。この防止方法に関しても、いくつかの提案がなされているが^{5) 6) 7) 13) 16)}、本研究では、制御入力の切り換えを連続化するため(26)式を以下のように書き換える。

$$k_j = \begin{cases} k_j^+ & \sigma x_j > \varepsilon \\ k_j^- & \sigma x_j < -\varepsilon \\ (k_j^+ - k_j^-) \sigma x_j / 2\varepsilon + (k_j^+ + k_j^-) / 2 & -\varepsilon < \sigma x_j < \varepsilon \end{cases} \quad (27)$$

スライディングモード理論をアクティブ制御に適用した場合には、(22)から(26)式の $\mathbf{x}(t)$ 、 \mathbf{A} および \mathbf{B} は、(7)式より求めた $\mathbf{x}_a(t)$ 、 \mathbf{A}_a 、および \mathbf{B}_a になる。

4. 数値シミュレーションと考察

(1) 橋梁, 車両, 動吸振器の諸元

スライディングモード理論による振動制御効果を確認するため, この理論をアクティブ制御およびハイブリッド制御に適用し, 数値シミュレーションを行った. これを最適レギュレータ理論を用いた場合と比較する. 本研究が想定した橋梁, 車両および動吸振器の諸元を, 表-1, 表-2 および表-3 に示した. 車両の速度は, 10 (m/sec) である. 動吸振器は現実的な値を得るため, 動吸振器の重量を橋梁の1/50の2 (tonf) とした. また前述のように, 固有振動数, 減衰定数は H_{max} 法により求めたものである.

(2) アクティブ制御の場合

アクティブ制御を用いた場合のシミュレーション結果とその考察について述べる. 図-5 は, 橋梁, 車両, 動吸振器の全状態量をフィードバックした場合のスライディングモード理論および最適レギュレータ理論の

Table 1 Characteristics of the bridge

Span (m)	40.0
Weight (kgf)	10.68×10^4
Flexural rigidity (kgf · m ²)	24.41×10^8
Damping constant	0.02 (1st~3th)

Table 2 Characteristics of the vehicle

Weight (tf)	20
Frequency (Hz)	3.0
Damping constant	0.03

Table 3 Characteristics of the TMD

Weight (tf)	2
Frequency (Hz)	2.278
Damping constant	0.1359

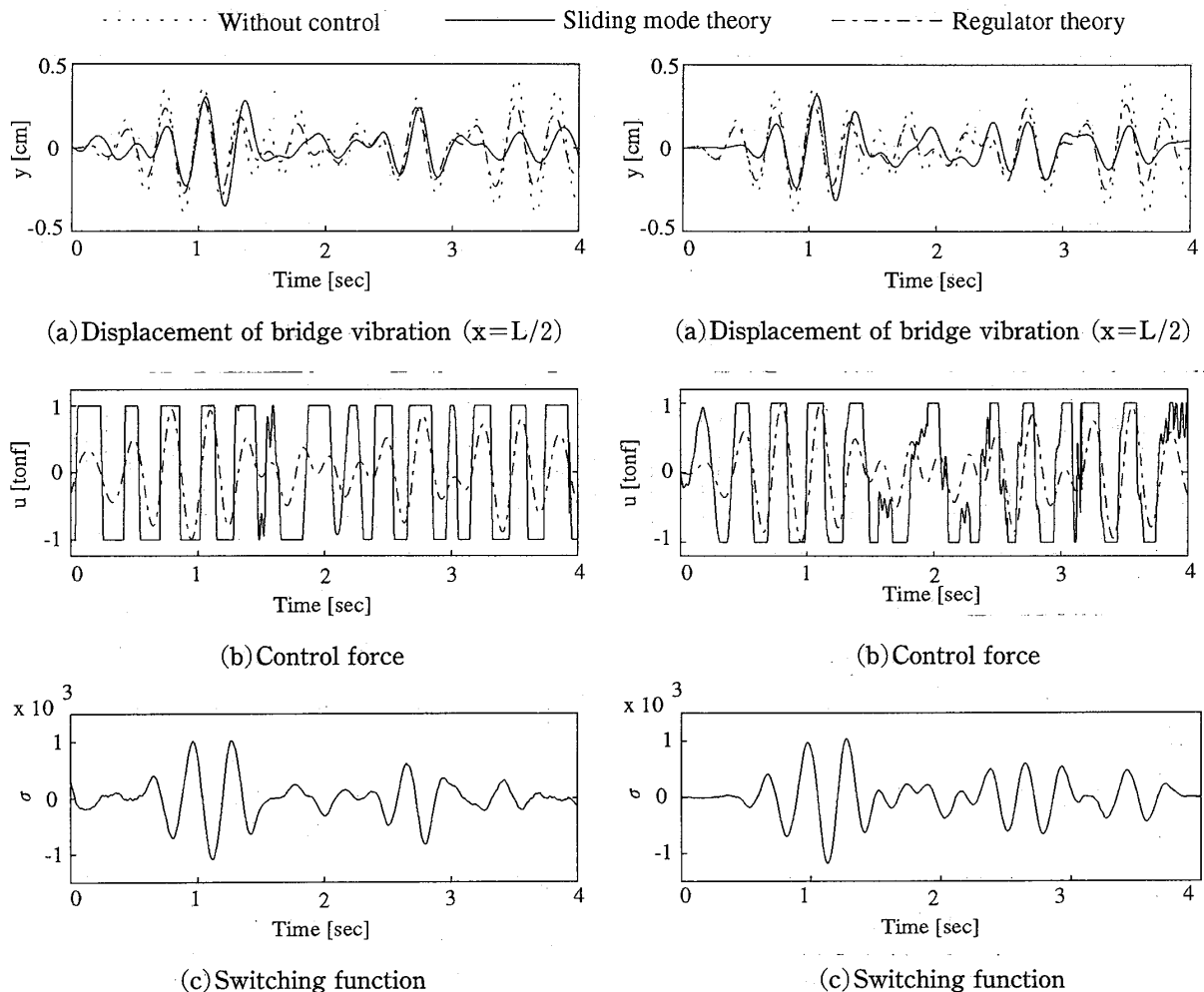


Fig. 5 Active control (feedback by all state variables)

Fig. 6 Active control (feedback by state variables of bridge)

比較である。これに対し図-6は、現実の橋梁-車両系で計測不可能となる車両以外の橋梁および動吸振器の状態量をフィードバックした場合である。それぞれ、(a)は変位応答、(b)は制御入力、(c)はスライディングモード理論の切換関数である。点線が非制御、実線がスライディングモード理論、破線が最適レギュレータ理論である。本論文において車両は、橋梁40 (m) 手前より路面凹凸上を走行し橋梁に進入するものとした。

数値シミュレーションの結果、図-5および図-6における(a)の変位応答の比較をみると、どちらの場合も全体的に、スライディングモード理論が最適レギュレータ理論より優れた制御効果を実現できることが確認できた。スライディングモード理論では時変系および未知外乱に対し、優れたロバスト性を有するからである。特に、図-6の車両をフィードバックしない場合に、最適レギュレータ理論に比べ良い結果となるのは、スライディングモード理論が外乱に対する不変性

を有するため、外乱発生の原因となる車両情報のフィードバックを必要としないためである。また、持続的な外乱が働くため全時間帯ではないが、図-6の0~0.6 (sec), 3.0~3.3 (sec), 3.7~4.0 (sec) 付近においては、スライディングモード理論の特徴である直線的な制御が実現されている。

スライディングモード理論に限定した場合、前半の0~0.6 (sec)、後半の3.0~4.0 (sec) においては、図-5の全状態量をフィードバックした方が悪い結果となった。このことは、適用したリカッチ方程式が定常理論であり、全時間帯において車両を中点に固定し、ゲインベクトル K を決定したためであると考えられる。

図-5と図-6の(b)は、それぞれ(a)の変位応答に対応する制御入力であり、実線がスライディングモード理論、破線が最適レギュレータ理論で、全てその最大値が1(tonf) になるように設定している。スライディングモード理論でのリカッチ方程式の重み係数 R 、 Q

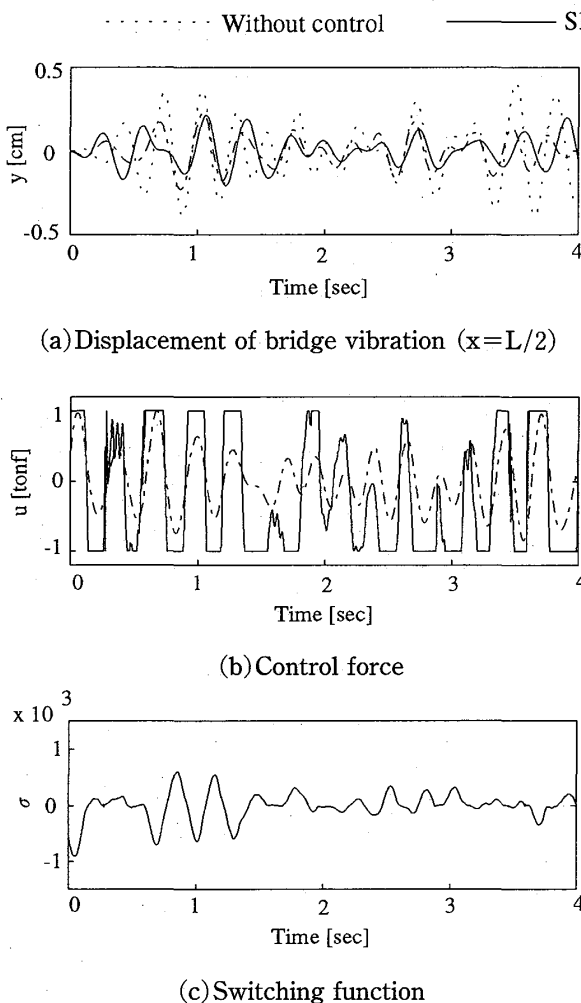


Fig. 7 Hybrid control (feedback by all state variables)

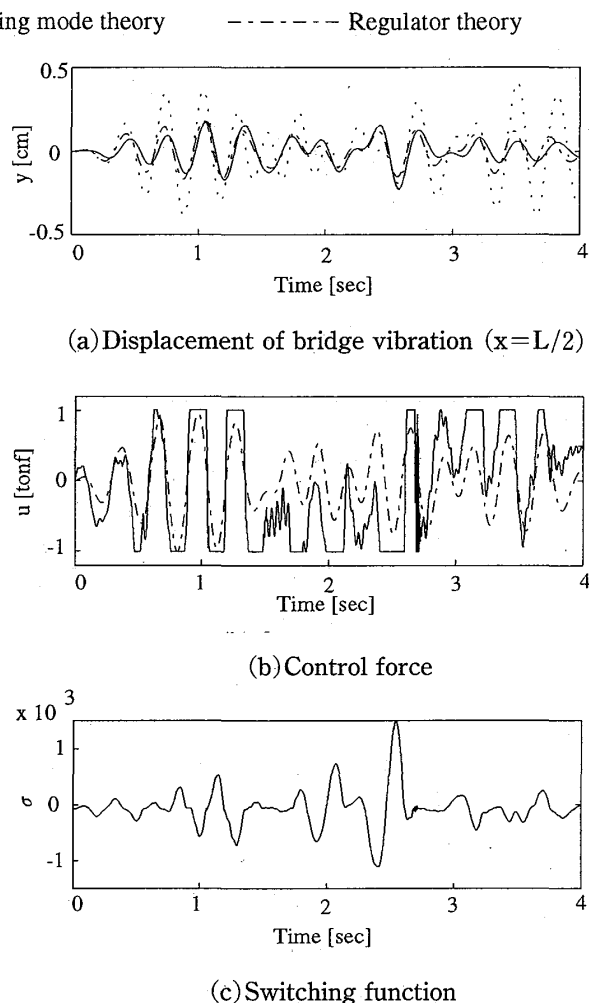


Fig. 8 Hybrid control (feedback by state variables of bridge)

は、それぞれの場合で対応する最適レギュレータ理論と同じ値を使い、さらに、制御入力に制限を加えている。2次式のフィードバックゲインを用い、制御入力を連続的に切り換えたため、スライディングモード理論における最大の欠点であるチャタリング現象が防止できている。

図-5と図-6の(c)はそれぞれの(a)(b)に対応するスライディングモード理論の切換関数 σ の波形であり、これが縦軸のゼロ点付近にある時に、スライディングモードが実現できることになる。これは、図-6の(a)について述べた直線的な制御が行われている時刻とほぼ一致しており、スライディングモードの実現が確認できる。橋梁の変位応答は、切換超平面の交線上をスライドしていくことになる。

(3) ハイブリッド制御の場合

アクティブ制御の場合と同様に、図-7および図-8は、全状態量をフィードバックした場合と車両を除く状態量をフィードバックした場合のスライディングモード理論および最適レギュレータ理論の比較であり、(a)は変位応答、(b)は制御入力、(c)はスライディングモード理論の切換関数である。点線が非制御、実線がスライディングモード理論、破線が最適レギュレータ理論である。

数値シミュレーションの結果、図-7および図-8(a)の変位応答の比較をみると、アクティブ制御の場合と同様に、どちらの場合も全体的に優れたロバスト性のため、スライディングモード理論が最適レギュレータ理論より良い結果を得ている。特に図-7の3.0~3.3(sec)、図-8の0~0.3(sec)の付近においては、直線的な制御が実現されている。また、スライディングモード理論と最適レギュレータ理論において、前半部分と後半部分で図-7の全状態量をフィードバックした方が悪い結果となった。これは、前で述べたように、適用したリカッチ方程式が定常理論だからである。

スライディングモード理論に限定し、前に述べたアクティブ制御の図-5、図-6とハイブリッド制御の比較をすると、ハイブリッド制御の方がよい結果となることが確認できる。現実の橋梁振動に適用する場合には、小さな制御入力ですむ、ハイブリッド制御が有利となる。

図-7と図-8の(b)は、それぞれ(a)の変位応答に対応する制御入力であり、実線がスライディングモード理論、破線が最適レギュレータ理論で、アクティブ制御と同じく、全てその最大値が1(tonf)になるように

パラメータを設定した。そこで、リカッチ方程式の重み係数 R 、 Q は、両理論で同じものを使い制御入力に制限を加えている。2次式のフィードバックゲインを用いたため、チャタリングが防止できている。

図-7と図-8の(c)はそれぞれの(a)(b)に対応するスライディングモード理論の切換関数 σ の波形である。(a)の変位応答で、直線的な制御となった、図-7の3.0~3.3(sec)、図-8の0~0.3(sec)と同時刻で、これらに対応する(c)の切換関数 σ が零点付近で推移している。これより、直線的な制御となったのは、スライディングモードが実現されたためであることがわかる。

5. まとめ

本研究では、道路橋振動のアクティブ制御とハイブリッド制御にスライディングモード理論を適用した場合の有効性を確認した。このため、橋梁の変位応答により従来の制御理論である最適レギュレータ理論と比較した。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 路面凹凸のパワースペクトル密度より凹凸例を作成し、橋梁-車両系振動のアクティブ制御およびハイブリッド制御のモデル化を行った。これに対する、スライディングモード理論とレギュレータ理論の定式化を行った。この時、スライディングモード理論で問題となるチャタリングの防止についても考慮した。

(2) 数値シミュレーションの結果、変位応答波形により、全体的にスライディングモード理論がレギュレータ理論より優れた制御効果が得られることを確認し、全時間帯ではないがスライディングモード理論の特徴である直線的な制御が実現できた。

(3) 車両以外の状態量をフィードバックした場合に比べ全状態量をフィードバックした場合、前半時間と後半時間において悪い結果となった。これは、フィードバックゲインベクトルの決定に用いたリカッチ方程式が定常理論であったためであると考えられる。

(4) スライディングモード理論によるアクティブ制御とハイブリッド制御の比較では、後者の方が優れた制御が実現できることを確認した。

(5) 制御入力の波形より、本研究で施した制御入力切り換えの連続化が有効に作用し、チャタリングが防止できた。また、切換関数の波形より、どの時間帯においてスライディングモードが実現されるかを確認した。

参 考 文 献

- 1) 矢作 柁, 吉田和彦; 高架橋における交通振動のアクティブコントロール, 土木学会論文報告集, 第356号-3, pp435-44, 1985. 4.
- 2) M. Abdel-Roman and H.H.E. Leipholz: Active Control of Flexible Structures, ASCE, J. of the Structural Division, Vol. 104, No. ST8, pp1251-66, 1978. 7.
- 3) 藤野陽三, ヒノド K. バルティア, 笠原 覚: 高架橋の交通振動に対するアクティブ制御, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp677-81, 1995. 3.
- 4) 川谷 充朗, 山田靖則, 下野正人, 清木計成, 森淳彦: 桁橋の交通振動に対するハイブリッド制御の模型実験, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp683-90, 1995. 3.
- 5) 山口宏樹, 増田高志, 伊藤亜木: 橋桁・車両連成振動系の動特性とそのロバスト制御に関する基礎研究, 日本機械学会, 第4回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, No95-28, PP271-74, 1995. 7.
- 6) 野波建蔵, 田宏奇: スライディングモード制御, コロナ社, 1994. 10.
- 7) 坂本憲昭, 増淵正美, 川田誠一: 不確かさを含む線形動的システムのロバスト制御, 計測自動制御学会論文集, vol. 28, No3, PP351-57, 1992.
- 8) 陳芸峰, 美多勉: 適応ロバストスライディングモード制御, 電気学会論文誌C, 電子・情報・システム部門誌, vol. 113, No3, pp203-10, 1993.
- 9) Atsushi Ishigame, Tadashi Furukawa, Shunji Kawamoto, Tsuneo Taniguchi: Sliding Mode controller Design Based on Fuzzy Inference for Nonlinear Systems, IEEE Trans. Ind, Electron., vol. 40, No1, 64-70, 1993. 2.
- 10) 小野裕幸: Mathematica DSP と制御, (株) トッパン, 1992. 10.
- 11) 石井慎一, 野波健蔵, 西村秀和, 中田修: ハイブリッド動吸振器を用いた搭状構造物のスライディングモード制御, 日本機械学会, 第3回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, No930-42, PP418-23, 1993. 7.
- 12) 岩本浩祐, 伊藤貴之, 野波健蔵, 西村秀和: μ 設計理論で周波数成形されたスライディングモード制御による柔構造物のアクティブ制御, 日本機械学会, 第4回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, No95-28, PP120-23, 1995. 7.
- 13) 徳永慎一, 高木哲也, 阿部直人, 嘉納秀明: パルスの推進力による振動制御, 日本機械学会, 第4回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, No95-28, PP116-19, 1995. 7.
- 14) 野波健蔵, 仁科研一: ゼロパワー磁気軸受系の離散時間スライディングモード制御, 日本機械学会, 第4回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, No95-28, PP33-36, 1995. 7.
- 15) 新部誠, 横山誠, 岩田義明: スライディングモード制御によるアンチロックブレーキシステム, 日本機械学会, 第4回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, No95-28, PP305-8, 1995. 7.
- 16) 北村康弘, 岩淵一徳, 野波健蔵, 西村秀和, 小林信之: フレキシブルロボットアームのスライディングモードサーボ位置決め制御, 第4回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, No95-28, PP194-7, 1995. 7.
- 17) 岡林隆敏, 加賀敏明: 動吸振器の最適設計に関する考察, 橋梁交通振動コロキウム論文集, PARTB, PP273-79. 1995. 11.
- 18) 岡林隆敏, 加賀敏明, 甲斐利彦: MATLAB 言語による道路橋交通振動の解析, 長崎大学工学部研究報告, 第26巻, 第46号, 1995. 9.