

226 ロバスト制御理論を用いた

アクティブバイブレーションコントロールに関する研究
— スライディングモード制御によるパネル振動制御の一検討 —

Active Vibration Control based on Robust Control Theory.

○津島 岳人、對木 逸人、浜田 晴夫（東京電機大）
井上 敏郎（本田技術研究所）Takehito TSUSHIMA, Hayato TSUIKI, Hareo HAMADA,
(Tokyo Denki University, 2-2 Kanda-nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo)
Toshio Inoue (HONDA R&D)

Recent studies of active vibration control (AVC) have a tendency to move more practical researches where they emphasize the importance of practical problems as well as the aspect of modern control theory. This tendency may reflect the practical difficulties due to the real plant characteristics such as time variances or non-linearity. In this paper, we introduced Sliding Mode Control Theory to cope with sharp fluctuations of the plants. We developed a real time Sliding Mode - Active Vibration Control (SM-AVC) system and examined the performances of this system including the robustness for time variances characteristics in the panel vibration experiments. In order to expand control frequency range of controller, we also introduce hybrid controller to apply Adaptive Prediction Control into the SM-AVC system (we refer this hybrid control as APSM-AVC). The several experiments reveal that APSM-AVC system has a great potential to be a wide band robust control system for active control of panel vibration.

Key Words : Sliding Mode Control Theory, Adoptive Prediction Nonlinear and Time Variant

1. 緒言

近年、パネルなどの振動制御の一手法として、能動的振動制御^[1] (AVC: Active Vibration Control) が注目されている。この AVC システムの実用化には、温度変化や経年劣化などによる制御対象の変動に対しても、安定した制御が可能である制御理論が重要となる。そこで本研究では、ロバスト制御理論の一つである、スライディングモード制御 (SMC: Sliding Mode Control) 理論^{[2],[3]}に着目した。

本稿では、スライディングモード制御理論に基づいたフィードバック型 AVC (SM-AVC) システムを構築し、制御対象の変動に対する振動制御効果について実時間制御実験により確認した。また、より広帯域のモード制御を目指し、SM-AVC と適応予測型 AVC^[4] (AP-AVC) を導入した併合型 AVC (APSM-AVC) を提案する。この APSM-AVC システムを構築し、実時間制御実験によりパネル振動の制御効果を確認したので報告する。

2. SM-AVC システムの設計

2.1. 可変構造システム理論の概要

スライディングモード制御理論の概要について述べる前に、その基礎理論となる可変構造システム (VSS: Variable Structure System) 理論の概要について述べる。

VSS 制御システムは、非線形なスイッチング入力によって安定性を得る制御手法であり、不連続的に変化する非線形制御の性格と、適応制御の性格の両面を持っている。これを式で表すと、式(1)のようなフィードバックシステムにおいて、式(2)のようにフィードバックゲイン K を切り換えて制御を行うシステムとなる。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ u = Kx \end{cases} \quad (1)$$

$$K = \begin{cases} k_1 & \text{if } Sx > 0 \\ k_2 & \text{if } Sx < 0 \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 $S = -\lambda x + \dot{x}$ であり、 λ は制御システムの固有ベクトルである。

Fig.1 に VSS 制御システムのブロック図を示す。

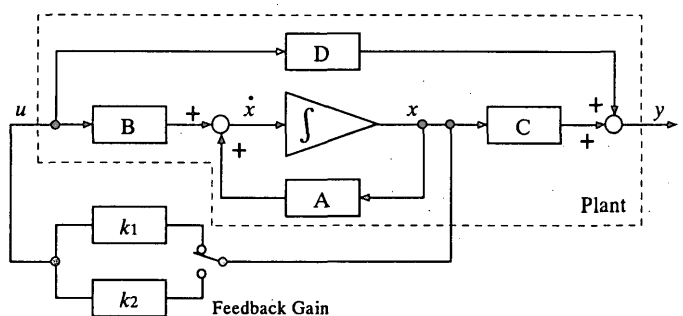


Fig.1 Block diagram of VSS Control system

さて、 $K=k_1 (k_1>0)$ のとき、不安定な 1 自由度系の位相平面軌跡は Fig.2(a) となり、また、 $K=k_2 (k_2<0)$ のときは Fig.2(b) となる。ここで、状態量 x によりフィードバックゲイン K を、式(2)のように切り換えることで制御入力 u を変化させ、Fig.2(c) に示す安定なシステムとすることができるとなる。

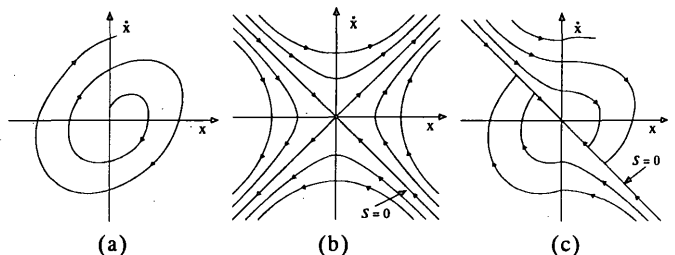


Fig.2 Phase plane trajectory of VSS control system

2.2. スライディングモード制御理論の概要

SMC 理論は、VSS 理論を拡張した理論である。SMC システムの作成には、超平面 S が重要となる。超平面 S の傾

きを Fig.3(a)のように設定すると、Fig.3(b)のように制御対象に変動が生じた場合、安定ではあるが、振動的な制御システムになってしまう。そこで、Fig.3(c)のように、固有ベクトル λ' より十分に小さい λ'' を傾きに持つ超平面 S' を作成する。これにより、状態量 x が超平面 S' 上に拘束され滑りながら原点に到達することになり、制御対象の変動に対し不感な制御システムが構築できる。

SMCシステムの特徴は、原点に至るまでの過渡状態であり、入力の数だけ低次元化され、また、動特性のみに支配されることなどが挙げられる。

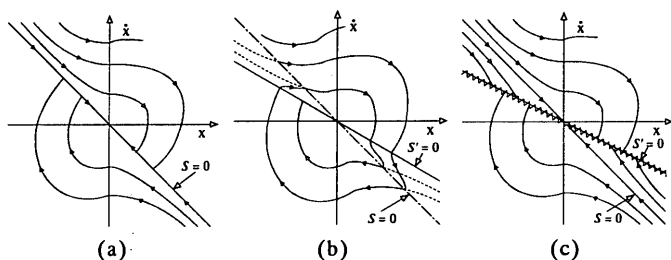


Fig.3 Phase plane trajectory of SMC system

2.3. SM-AVC システムの設計

本稿では、超平面の設計法として、システムの零点を用いる方法を用いることとした。また、高周波数領域を制御しないという観点から、スピルオーバーやチャタリング、さらに高周波数のノイズ対策として、入力端周波数整形法を用いて設計することとした。次に、スライディングモードコントローラとして最終スライディングモード制御法を用いることとした。また、観測できない状態量の推定として、同次元線形オブザーバを用いることとした。

これらの方法を用いて作成した SM-AVC システムのブロック図を Fig.4 に示す。

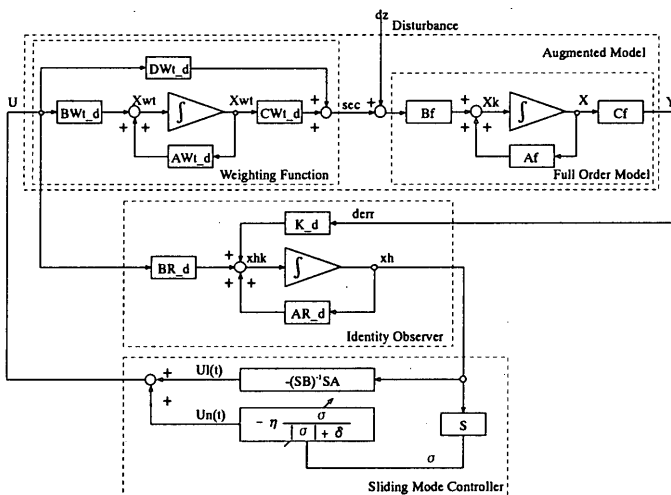


Fig.4 Block diagram of SM-AVC system

3. SM-AVC システムの実時間制御実験

3.1. 実験目的

AVC システムの実用化には、温度変化や経年劣化などに伴い制御対象が変動した場合においても、安定した制御が可能なシステムが必要となる。そこで、SM-AVC システムの振動制御効果およびロバスト安定性を実時間制御実験の結果により確認することを目的とした。

まず、制御対象が変動した場合の制御効果と比較を行うために、制御対象の変動がない場合における SM-AVC システムの振動制御効果の確認を行った。次に、制御対象が変

動した場合の SM-AVC システムの振動制御実験を行った。制御対象の変動としては、気温が 5[℃]上昇した場合と、制御対象の重量の 10%にあたる約 0.2[Kg]の重りを乗せた場合とした。

3.2. 実験装置

実験に用いるパネルには 600×500×0.8[mm]のパネルを用いることとした。このパネルの四方をフレームで固定した。また、外界からパネルに伝わる振動を絶縁する方法として、フレームにバネを設置し空中に浮かせることとした。また、振動制御用のアクチュエータおよび加速度センサをパネルの中心に設置した。制御すべき振動である外部入力信号は、パネルの直下 500[mm]の位置に加振器を設置し、その加振器により、フレームの四隅を加振することにより加えることとした。なお、外部入力信号には、白色雑音信号を遮断周波数 250[Hz]のローパスフィルタによりフィルタリングした信号を用いた。Fig.5 に実験装置の構成を示す。

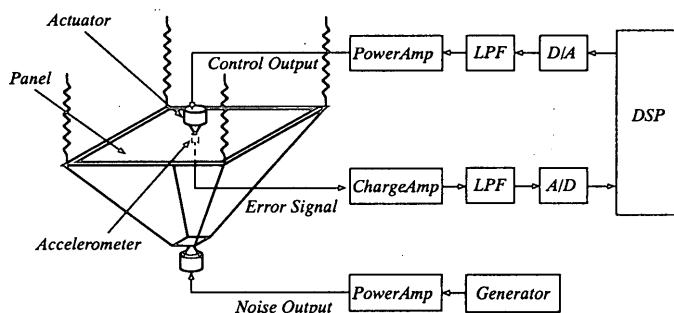


Fig.5 Construction of experimental device

まず、パネルの中心に設置した加速度センサにより、制御目的となる振動の加速度信号を計測する。この加速度信号を小さくするような制御信号を、制御用のアクチュエータに加え振動制御する。なお、この制御信号は、制御理論を基にデジタル信号処理装置 (DSP: Digital Signal Processor) により作成する。最後に、制御した場合の加速度信号と制御しない場合の加速度信号をデータレコーダにより記録し、制御効果を確認した。

3.3. 制御システムの構築

制御対象の変動を考慮し、安定性を重視したコントローラを作成することとした。そこで、SM-AVC システムの設計では、安定余裕項 ϵ を 16 として超平面を作成した。また、非線形入力切替ゲイン η を 0.5、チャタリング防止の平滑化係数 δ を 0.04 として、スライディングコントローラを設計した。また、制御対象とした低周波数帯域において大きく、高周波数帯域において小さくなるように、入力端周波数重み関数 W_t を式(3)のように設計した。Fig.6 に重み関数の周波数特性を示す。

$$W_t = \frac{337.2^2}{s^2 + 6.3s + 337.2^2} \times \frac{218.6^2}{s^2 + 41.5s + 218.6^2} \quad (3)$$

なお、制御対象となる定義モデルには、実験モード解析^{[5],[6]}により求めた 6 自由度のモデルを用いた。また、SM-AVC システムの設計に用いる公称モデルは、3 自由度のモデルを用いることとした。これらのモデルを Fig.6 に示す。

この公称モデル及び超平面、スライディングコントローラ、重み関数を用いて SM-AVC システムを構築した。

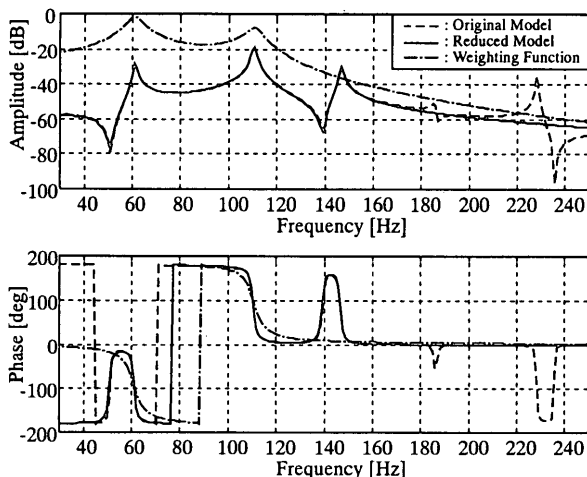


Fig.6 Result of Modeling

3.4. 実験結果

制御対象に変動を加える前に振動制御実験を行った結果を Fig.7 に示す。破線は制御前の周波数応答であり、実線は制御を行った場合の周波数応答である。Fig.7 より、制御前よりも制御後の方が制御対象としたモードにおいて振幅が小さくなっていることが確認できる。

次に、気温を 5[℃]上昇させ、制御対象に変動を加えた場合に振動制御実験を行った結果を Fig.8 に示す。破線は制御前の周波数応答であり、実線は制御を行った場合の周波数応答である。Fig.8 より、制御前よりも制御後の方が制御対象としたモードにおいて振幅が小さくなっていることが確認できる。

また、制御対象の重量の 10%にあたる約 0.2[Kg]の重りを乗せ、制御対象に変動を加えた場合に振動制御実験を行った結果を Fig.9 に示す。破線は制御前の周波数応答であり、実線は制御を行った場合の周波数応答である。Fig.9 より、制御前よりも制御後の方が制御対象としたモードにおいて振幅が小さくなっていることが確認できる。

以上のことにより、このような制御対象の変動に対して、SM-AVC システムは、安定な制御が可能であり、また、変動前と同等の制御効果を得ることが可能であることが確認できた。

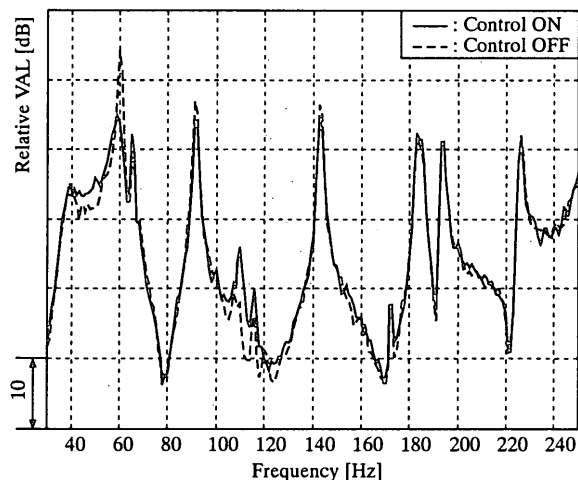


Fig.7 Relational acceleration response of SM-AVC

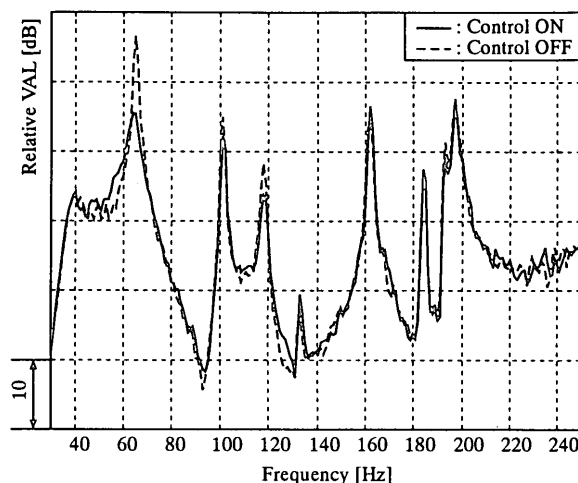


Fig.8 Relational acceleration response after the system change with temperature change

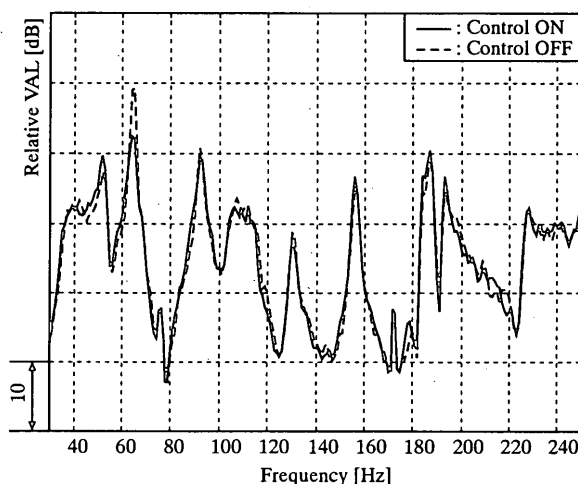


Fig.9 Relational acceleration response after the system change with mass change

4. APSM-AVC システムの提案

フィードバック型制御では、高周波領域での振動制御は困難であると示唆されている。そこで、SM-AVC システムに、広帯域でモード制御が可能な AP-AVC システムを併合した APSM-AVC システムを提案する。APSM-AVC システムのブロック図を Fig.10 に示す。

APSM-AVC システムでは、SM-AVC が低次モードを、AP-AVC が高次モードをそれぞれ制御する周波数分離制御を行う。なお、制御器間の干渉を低減させるため、SM-AVC のエラー信号に変位信号を、AP-AVC のエラー信号に加速度信号をそれぞれ用いている。

Fig.10 の C は二次伝達系であり、SM-AVC により制御を行っている際のアクチュエータとエラーセンサの間の伝達特性を表している。また、 $\hat{c}$ は適応モデリングにより二次伝達系をモデリングしたもので、アクチュエータとエラーセンサの特性、A/D 変換器、アンチエイリアスフィルタ、D/A 変換器、再構成フィルタなどの電気的な特性を含んだ FIR フィルタで構成されている。

AP-AVC システムでは、上部を制御過程、下部を学習過程として、2つの過程に分けて考えることができる。

制御過程においては、エラーセンサより得られた信号から、二次出力信号を $\hat{y}$ に畳み込んだ信号を減算し、外部入力信号を算出する。この外部入力信号は制御フィルタと学習過程に与えられる。なお、二次出力信号は、外部入力信

