401 1車輪モデルに対する単一入力ルール群結合型ファジィ推論を用いたアクティブサスペンションに関する一研究

An Active Suspension System of One-Wheel Car Models Using Fuzzy Reasoning Based on Single Input Rule Modules

○学 檜皮 隆宏 (徳大院) 正 芳村 敏夫 (徳大工)
正 栗本 政雄 (徳大工) 正 日野 順市 (徳大工)

Takahiro Hiwa; School of Engineering, The University of Tokushima, Minamijosanjima-cho2-1, Tokushima770-8506, Japan
Toshio Yoshimura, Masao Kurimoto, and Junichi Hino; Faculty of Engineering, The University of Tokushima

Key words : One-wheel car model, Active suspension, Fuzzy reasoning, Single input rule modules

1. 緒言

自動車のサスペンションの機能は、路面不整により誘発される車輪の上下振動が車体に直接伝達されるのを防止することであり、アクティブサスペンションは空圧・油圧などのアクチュエータを用い、車体に対して直接エネルギーを供給するため高周波領域まで制御できることを特長としている。⁽¹⁾

本研究では、1車輪モデルの乗用車に対して空気圧式アクティブサスペンションを設計することを目的とする。ここでは、乗用車モデルには非線形性や不確実性が含まれるため、制御の目的とする情報を制御則に反映できるファジィ推論を用いることにする。

2. 実験装置の構成と基本特性

2-1 装置の概略 1車輪モデルに対して空気圧式アクチュエータによって制御する実験装置の概略図をFig.1に示す。⁽²⁾ 車体部に相当する質量 m_1 は2本の垂直軸により拘束され、またサスペンション部は2本の線形コイルばね(ばね定数 k_1)と4本の線形コイルばね(ばね定数 k'_1)、および空気圧式アクチュエータによって構成されている。サスペンション部の非線形特性はこれら6本のコイルばねを組み合わせることで実現する。車輪に相当する質量 m_2 にはサスペンション部の質量を含み、下部にタイヤの剛性としての空気ばね(ばね定数 k'_2)が取り付けられている。路面入力 f_e は電気式加振機で発生する力を f_e とし、質量 m_1 、 m_2 によって生じる重力を質量 m_3 の板と2本のコイルばね(ばね定数 K)で支持している。制御入力 u は、各センサーによりサンプリング時刻毎に検出された車体部の加速度 $\ddot{z}_1$ 、速度 $\dot{z}_1$ 、変位 z_1 、車輪部の速度 $\dot{z}_2$ 、変位 z_2

をA/D変換器およびカウンタを介し、パーソナルコンピュータに取り込み、提案する制御則に基づいて生成される。その制御入力はD/A変換器、パワーアンプを介して制御弁を駆動し、シリンダの上下室内にそれぞれ圧力 p_u 、 p_d を与えて制御量 u を発生する。

2-2 アクチュエータ部の動特性 ここでは、2自由度の1車輪モデルを対象として、アクチュエータ部の動作遅れが制振性能に及ぼす影響を明らかにする。制御則は、簡単のため線形とし次式のように与える。

$$u = K_a \ddot{z}_1 + K_v \dot{z}_1 + K_d z_1 \quad (1)$$

Fig.1 Experimental apparatus of one-wheel car model

Fig.2 Gains of frequency responses obtained by four methods

ここで、フィードバックゲイン K_a 、 K_v および K_d は、それぞれ共振点でのピーク値が最小になるように決定した。この線形制御によるアクティブサスペンションとパッシブサスペンション($u(t) \equiv 0$)の応答を比較する。Fig.2(a)に示すパッシブ制御においては、3Hz付近に大きな共振値が生じている。Fig.2(b)に示す加速度フィードバック($K_v = K_d = 0$)においては、共振点が低周波領域に移動するとともにピーク値は低下するが、5Hz付近においては若干制振性能が劣化している。

Fig.2(c)に示す速度フィードバック ($K_a=K_d=0$) においては、低周波領域においては制振性能が向上するが、共振点が高周波領域に移動し、かつ制振性能が劣化している。Fig.2(d)に示す変位フィードバック ($K_a=K_v=0$) においては、むだ時間による影響も少なく共振点でのピーク値を下げる効果がある。

3. 多入力アクティブサスペンションシステムの構築

3-1 **SIRMs ファジィ推論法** ここでは多入力アクティブサスペンションシステムの構築に用いる SIRMs ファジィ推論法⁽³⁾を用いる。このファジィ制御側は、式(2)で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{SIRM -1: } & \{R_1: \text{if } \alpha_1 \text{ is } A_{1j} \text{ then } \beta_1 \text{ is } b_{1j}\}_{j=1}^{n_1} \\ \text{SIRM -i: } & \{R_i: \text{if } \alpha_i \text{ is } A_{ij} \text{ then } \beta_i \text{ is } b_{ij}\}_{j=1}^{n_i} \\ \text{SIRM -n: } & \{R_n: \text{if } \alpha_n \text{ is } A_{nj} \text{ then } \beta_n \text{ is } b_{nj}\}_{j=1}^{n_n} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 α_i 、 β_i はそれぞれ前件部、後件部変数、また A_{ij} はファジィ集合、 b_{ij} は実数値 (非ファジィ値) を示す。ここでは、前件部変数としてサンプリング時刻毎に観測値を $[-1, 1]$ に規格化して用いる。

適合度 h_i^j は式(3)、推論値 β_i^* は式(4)により求まる。

$$h_i^j = \mu_{A_j} \{\alpha_i\} \quad (3)$$

$$\beta_i^* = \sum_{j=1}^{n_i} h_i^j \cdot b_{ij} / \sum_{j=1}^{n_i} h_i^j \quad (4)$$

非ファジィ化値 β_i^* が求まったとき、アクチュエータに与える制御力 u は、

$$u = \sum_{i=1}^n g_i \beta_i^* \quad (5)$$

となる。ただし、 g_i は重みを示す定数である。ここでは入力変数として $\ddot{z}_1$ 、 $\dot{z}_1$ 、 z_1 、 $\ddot{z}_2$ 、 $\dot{z}_2$ 、 z_2 を用いる。

3-2 **むだ時間補償器の設計** すでに SIRMs ファジィ制御においてメンバーシップ関数やファジィルールを調整することで良好な制振効果を得ている。⁽²⁾ この推論法は、外乱の帯域幅が狭いときに強い制振効果を得ることができるが、制振効果が劣化するのでロバストな制御系を設計するのは困難であった。そこで 2-2 で述べた加速度フィードバックおよび速度フィードバックの制振効果に着目し、その性能を改善するむだ時間補償器を設計する。それをファジィ推論法に結合することで、ロバスト性に優れたアクティブサスペンションシステムを設計する。車体部加速度に対しては、高周波領域において制御ゲインがローとなるよう式(6)のバンドストップフィルタを用いる。また車体部速度に対しては、全領域で位相進みとなるよう式(7)の位相進み回路を用いる。

$$H_{BSF}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + \omega_0 s + \omega_0^2} \quad (\zeta < 0.5) \quad (6)$$

$$H_{FFN}(s) = a \frac{1+Ts}{1+aTs} \quad (0 < a < 1) \quad (7)$$

4. 結果及び考察

Fig.3(a)には車体部の加速度に対して、また Fig.3(b)には車体部の速度に対してむだ時間補償器を施した場合と施さない場合を比較した周波数応答のゲインを示す。補償した場合は補償しない場合に比べて、低周波領域ではゲインが多少増加しているが、高周波領域における共振点でのピーク値を大幅に抑えている。Fig.3(c)には、むだ時間補償器をファジィ推論部に結合した場合としない場合を比較した周波数応答のゲインを示す。補償をしない場合では、6Hz までの低周波領域においてゲインは減少するが、高周波領域においてパッシブサスペンションよりも性能劣化している。補償をした場合では、

低周波領域においてゲインを減少させ、かつ高周波領域においてもゲインの増大を抑えている。

Fig.4 Gains of frequency responses due to active controls with and without compensation

5. 結言

本研究では、空気圧シリンダと電空比例圧力制御弁を用いたアクティブサスペンションを SIRMs ファジィ推論を用いて設計し、良好な制振性能を示すことを実験により立証した。また、本ファジィ推論法に対しむだ時間補償器を結合することで、ロバスト性にすぐれたアクティブシステムを実現することができた。

参考文献

- (1) カヤバ工業編, 自動車のサスペンション, (1991), 207.
- (2) 芳村敏夫・竹井一剛・栗本政雄・日野順市, 機論, 67-658, (2001), 1779-1784.
- (3) 湯場崎直養・易建強・廣田薫, 日本ファジィ学会誌, 9-5, (1997), 699-709.