

# フィードバック制御による油圧アクティブサスペンションの乗り心地向上

2000MM067  
指導教員

西川 晶子  
高見 勲

## 1 はじめに

### 1.1 動機

車の乗り心地を良くするという事は上下振動を小さくすることである。このことから、今回車体の振動を積極的に打ち消すアクティブサスペンションに着目した。

### 1.2 目的と課題

路面からの上下変位を外乱とみなし、車体変位が0メートルを目標値として、安定化制御器を求める。また、コントローラ設計にあたって、人体が不快に感じる周波数は内臓が共振する約3~8Hz(18.8~50.3rad/s)であり、その周波数帯の振動を低減する。また、車体が動いてから制御するには制御システムの応答遅れを非常に小さくする必要がある。そこで、車体変位の速度フィードバック制御を検討する。フィードバックゲインは、系が安定、外乱抑制、特定の周波数を抑制の3つの条件を元に決定する。

## 2 アクティブサスペンション

本研究では車体の操縦安定性ではなく、乗り心地向上を目的とし上下方向の振動を問題とする。よって、四輪ではなく単輪からなるモデルを制御対象とする。

### 2.1 アクティブサスペンションとは

路面の凸凹はタイヤが上下することで吸収し、車体の姿勢変化がほとんどない状態で走行することができる。上下加速度や横加速度の検出センサーを始め、様々なセンサーによって走行状態を把握する。そして、外部からエネルギーを供給し、油圧によってタイヤの上下運動を電子制御でコントロールする。[1]

## 3 制御系設計

### 3.1 モデル化

制御対象の物理モデルを線形化すると状態方程式が求められる。

#### 3.1.1 状態方程式

状態量を  $x$  , 外乱を  $w$  , 操作量を  $u$  , 制御出力を  $z$  とすると、状態方程式は以下のように求められる。

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u$$

$$z = Cx + Du$$

$$x = (x_{01} \quad x_{12} \quad v_{ci} \quad \dot{x}_1 \quad \dot{x}_2 \quad q_{ci})^T$$

$$w = \dot{x}_0, \quad z = \dot{x}_2, \quad u = I [4]$$

コントローラの伝達関数を  $K(s)$  とすると、この系の  $w$  から  $z$  への伝達関数  $G(s)$  は下式で得られる。

$$G(s) = C(sI - AB_2 K(s)C)^{-1} B_1$$

### 3.2 最適レギュレータによる状態フィードバック制御

状態フィードバック制御は制御対象が可制御であるということが言えれば、必ず安定した制御系を構築することが可能である。よって、簡潔で安定した制御を行うために、状態フィードバック制御を用いる。

状態フィードバック制御の中でも、任意の初期値に対して、常に制御誤差を0に保つように動作する制御を行う。この制御では、速く初期値を0に近づけるためにゲインを大きくすると、同時に制御入力も大きくなるので、ゲインは無限に大きくすることはできないという制限がある。そこで、ゲイン決定において有力な方法である、最適レギュレータ

制御を行う。これは、状態方程式に対して評価関数

$$J = \int_0^{\infty} (x(t)^T Q x(t) + Ru(t)^2) dt$$

を導入し、この  $J$  が最小になるように制御入力

$$u(t) = K^T x \quad (K < 0)$$

を決め、ゲイン

$$K = -\frac{1}{R} B^T P$$

を求める。  $P$  は可制御であれば一意に決まる。ただし、以下のリカッチ方程式を満たす。

$$A^T P + PA - \frac{1}{R} PBB^T P + Q = 0 [2]$$

### 3.3 可制御性

可制御とは、任意の目標とする状態に移すことができる操作量がシステムに存在することを言う。システムの可制御性を判別する。[3]

### 3.4 フィルタの設計

制御しやすくするために、3~8Hz(18.8~50.3rad/s)の周波数帯でゲイン(ペナルティ)が大きいフィルタを作用させる。これにより、閉ループ系において特定周波数帯のゲインを低下させることができる。フィルタは図2のような周波数特性を持つ。

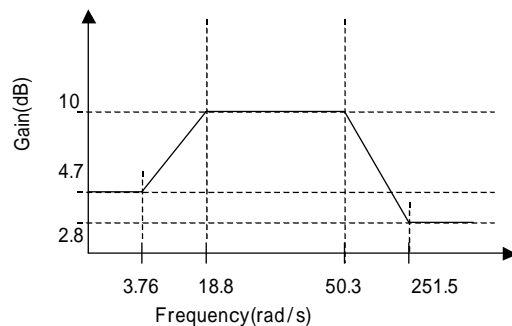


図1 フィルタの周波数特性

図1の周波数特性をもつ伝達関数を求める。

$$W(s) = \frac{1+T_2 s}{1+T_1 s} \cdot \frac{1+T_4 s}{1+T_3 s}$$

ただし、

$$1/T_1 = 3.76, \quad 1/T_2 = 18.8, \quad 1/T_3 = 50.3, \quad 1/T_4 = 251.5$$

である。状態方程式は

$$\dot{x}_w = W_A x_w + W_B z$$

$$W_z = W_C x_w + W_D u$$

となる。

### 3.5 拡大系

フィルタを通した上で制御を行うので、フィルタを含む系を拡大系とする。拡大系の状態方程式は以下となる。

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}_1 w + \bar{B}_2 u$$

$$\bar{z} = \bar{C}\bar{x} + \bar{D}u$$

ただし、各要素は以下となる。

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_w \\ x \end{bmatrix}, \bar{A} = \begin{bmatrix} W_A & W_B C \\ 0 & A \end{bmatrix}$$

$$\bar{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 \end{bmatrix}, \bar{B}_2 = \begin{bmatrix} W_B D \\ B_2 \end{bmatrix},$$

$$\bar{C} = [W_C \quad W_D C], \bar{D} = W_D D,$$

$$u = Kx \quad (K < 0),$$

$$\bar{z} = W_c x_w + W_D C_1 x + W_D D_{12} u$$

#### 4 ゲイン決定

4.1 評価関数により求められた重み行列による決定  
 値を減少させたいものはフィルタを含む拡大系の制御出力  $\bar{z}$  であるので、評価関数は下記となる。

$$J = \int_0^{\infty} (\bar{z}^T \bar{z} + u^T R u) dt$$

$$= \int_0^{\infty} (\bar{x}^T \bar{C}^T \bar{C} \bar{x} + u^T R u) dt$$

R を調整することによって、u の変動範囲内で x を早く収束させることができる。ゲインは、以下のように求められる。

$$K = \begin{bmatrix} -0.40 & 0.00 & -1.50 & -1.60 \\ -206 \times 10^2 & -020 & 0.20 & -231 \times 10 \end{bmatrix}$$

#### 5 外乱応答

ここでの外乱は、路面の連続した小さな凹凸を 3 ~ 8Hz (18.8 ~ 50.3rad/s) の正弦波入力で近似し、階段状の路面変化をステップ入力で近似する。また、外乱応答を見る制御系の伝達関数は、制御対象にコントローラを加えた閉ループである。この計算は "MATLAB (\*)" を使用して容易に得ることができる。

##### 5.1 30rad/s の正弦波

30rad/s、振幅 1 の正弦波を外乱とする。制御後、揺れは 1/15 に緩和されていることが分かる

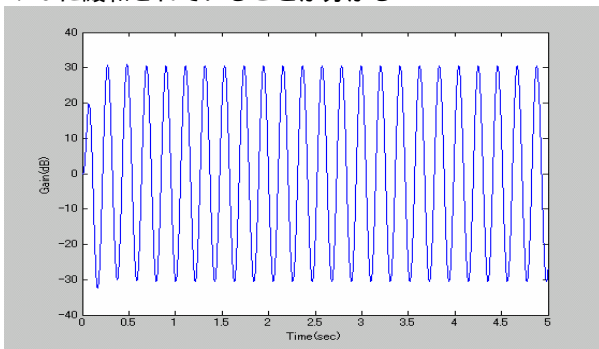


図 2 制御前の車体加速度特性

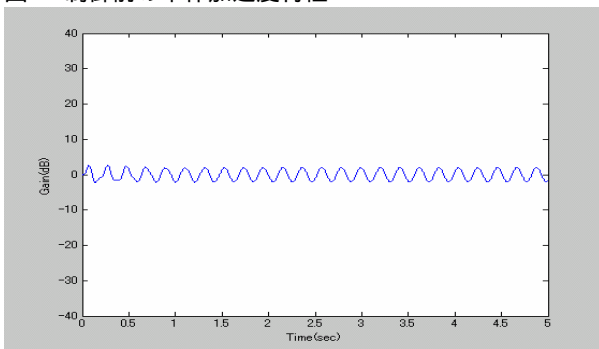


図 3 制御後の車体加速度特性

#### 6 ボード線図比較

御前後で比較する物は、制御対象の開ループの伝達関数と、求めたゲインそれぞれによる拡大系の閉ループの伝達関数である。

特定の周波数帯において、ゲインは 1/15 ~ 1/2 程度下げること成功した。

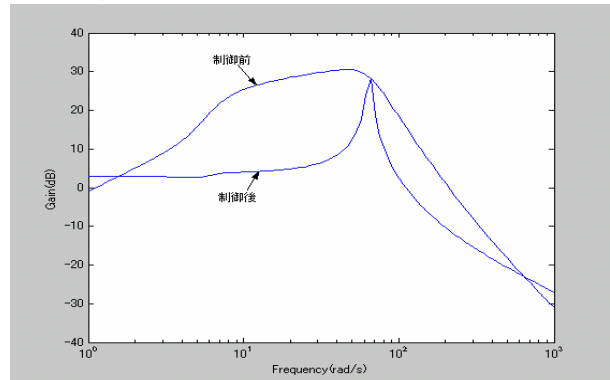


図 4 制御の有無の比較

#### 7 おわりに

##### 7.1 結論

本研究の目的は、乗り心地向上のため不快に感じる周波数帯 3 ~ 8Hz (18.8 ~ 50.3rad/s) の平均車体加速度 (ゲイン) を抑制させることである。この手段として、元の系に周波数帯 3 ~ 8Hz 間のみゲインが高いフィルタを結合させた拡大系を構築し、それに対して最適レギュレータに基づく状態フィードバック制御系を構築する。

結果は、周波数領域においてゲインを低下させるという本研究の目的は達成された。また外乱応答が 1/15 に弱められると、ボード線図上でも同様に 1/15 に弱くなるので、この結果は理論的に正当であることが分かる。ステップ応答に対するシミュレーションの結果、レギュレータは期待通りに動作して衝撃を緩和することに成功している。

##### 7.2 今後の課題

ここで示した制御方式は状態フィードバックを基本としているが、全ての状態が観測可能とは限らない。よって本方式の実用化には状態観測機構 (オブザーバ) の採用を検討する。

#### 参考文献

- [1] カヤバ工業株式会社, "自動車のサスペンション", カヤバ工業株式会社.
- [2] 岩井 善太, ほか, "制御工学", 朝倉書店.
- [3] 川田 昌克, ほか, "MATLAB/Simulink によるわかりやすい制御工学", 森北出版.
- [4] 川谷 亮治, ほか, "H 制御理論に基づくアクティブサスペンションの制御", 計測自動制御学会論文集 Vol.27 No.5.

(\*) MATLAB/Simulink は米国 the MathWorks 社の登録商標です。