

アクティブサスペンションの最適制御

2011SE123 河合 一輝

指導教員：大石 泰章

1 はじめに

自動車を高速走行させる際に車内で感じる振動は運転者に負担となり、乗り心地の快適性を損ねる。これらの課題を解決する装置として、バネとダンパを用いるサスペンションが挙げられるが、特にアクティブサスペンションは画期的な性能を持つ。アクティブサスペンションとは、路面や走行状況によって発生する自動車の揺れを検知し、車内で感じる揺れを抑えるように電子制御する装置である。車体の姿勢を安定させるため、運転時の負担を軽減させるほか、乗り心地を快適にすることができる。

本研究では、Quanser 社製のアクティブサスペンションの実験装置 [1, 2] を用いて最適制御を行い、最適制御の有効性の確認や、適用の際の留意点の抽出を行う。特に、実験装置のパラメータ同定を実施し、重み行列 Q と R の適切な選択を行うことを目標とする。

2 制御対象

2.1 基本構造とモデリング

本研究で使用する Quanser 社製の、アクティブサスペンションを模した装置 [1] の概略図を図 1 に示す。

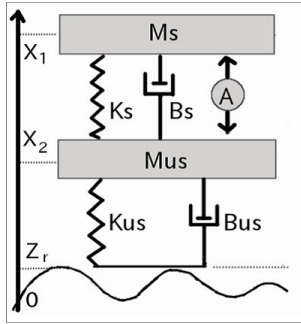


図 1 アクティブサスペンションの概略図

図中の M_s は車体、 M_{us} はタイヤの車軸にあたる。モータ A を制御して、路面の凹凸にあたる変位 z_r の影響を抑制する。 M_s と M_{us} の間には、バネ K_s とダンパ B_s が取り付けられている。 M_{us} と z_r との間には、バネ K_{us} とダンパ B_{us} が取り付けられている。モータ A が生成する力を F_c とする。このとき、図 1 において、 M_s および M_{us} に関するニュートンの運動方程式を考える。 M_s と M_{us} の位置をそれぞれ x_1 , x_2 とおくと、

$$\ddot{x}_1 = -g + \frac{F_c}{M_s} + \frac{B_s \dot{x}_2}{M_s} - \frac{B_s \dot{x}_1}{M_s} + \frac{K_s x_2}{M_s} - \frac{K_s x_1}{M_s}, (1)$$

$$\ddot{x}_2 = -g - \frac{F_c}{M_{us}} - \frac{(B_s + B_{us}) \dot{x}_2}{M_{us}} + \frac{B_s \dot{x}_1}{M_{us}} + \frac{B_{us} \dot{z}_r}{M_{us}} - \frac{(K_{us} + K_s) x_2}{M_{us}} + \frac{K_s x_1}{M_{us}} + \frac{z_r K_{us}}{M_{us}} (2)$$

が得られる。ここで重力に関係する項を除くため、振動が起きていない状態 ($z_r = 0$, $\dot{z}_r = 0$, $F_c = 0$) を仮定する。その状態では、 $\dot{x}_1 = 0$, $\ddot{x}_1 = 0$, $\dot{x}_2 = 0$, $\ddot{x}_2 = 0$ である。これらを代入すると平衡点を求めることができる。これを式 (2) および式 (1) に代入し、変数 z_{us} と z_s をそれぞれ、平衡点からの車軸、車体の距離と定義すると、

$$z_s = x_1 + \frac{M_s g}{K_s} + \frac{g(M_s + M_{us})}{K_{us}}, (3)$$

$$z_{us} = x_2 + \frac{g(M_s + M_{us})}{K_{us}} (4)$$

となる。式 (3), (4) を微分し、式 (2), (1) に代入して、状態変数を $x = [z_s - z_{us} \quad \dot{z}_s \quad z_{us} - z_r \quad \dot{z}_{us}]^T$, 入力を $u = F_c$, 外乱を $d = \dot{z}_r$ とすると、状態方程式は

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ed (5)$$

である。ただし、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{K_s}{M_s} & -\frac{B_s}{M_s} & 0 & \frac{B_s}{M_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_s}{M_{us}} & \frac{B_s}{M_{us}} & -\frac{K_{us}}{M_{us}} & -\frac{B_s + B_{us}}{M_{us}} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M_s} \\ 0 \\ -\frac{1}{M_{us}} \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ \frac{B_{us}}{M_{us}} \end{bmatrix}$$

である。

2.2 システム同定

文献 [2] に記載のパラメータ値を用いて実験を行うと、シミュレーションと実機実験の結果大きく違いが出る。そこで、いくつかパラメータ値を変更して実験を行うこととした。開ループのとき、つまりアクチュエータを使用せずに振動を与えた場合に、車体の位置 z_s のシミュレーション結果を実機実験の結果に一致させるよう、試行錯誤により M_s , M_{us} , K_s , K_{us} , B_s , B_{us} の値を変更した。マニュアルに記載されている値と、変更した値を表 1 に示す。 M_s の挙動をシステム同定の前後で記録したグラフを、それぞれ図 2, 図 3 に示す。

図 2 に比べ、図 3 のほうが、シミュレーションと実機実験の結果が近くなっており、今回のシステム同定が有効なものであると考える。以下の制御系設計では、表 1 の下段の値を用いることにする。

表 1 システム同定で決定したパラメータの値

パラメータ	M_s	M_{us}	K_s	K_{us}	B_s	B_{us}
文献 [2] の値	2.4	1	900	1250	7.5	5
決定した値	2.6	1.1	800	1800	23	9

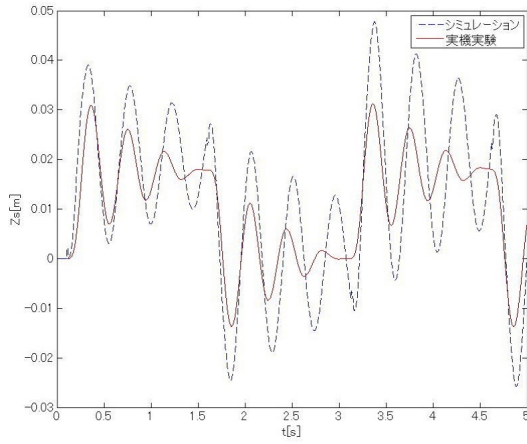


図 2 M_s (車体) の挙動 (システム同定前)

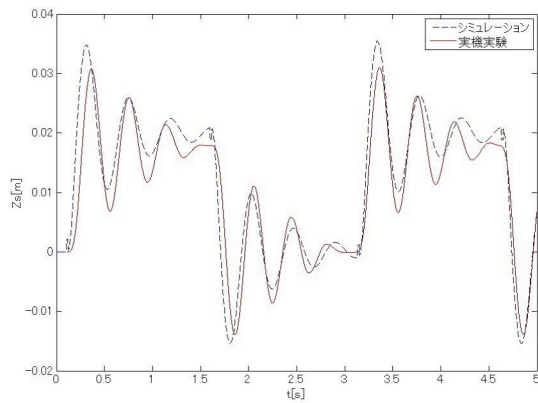


図 3 M_s (車体) の挙動 (システム同定後)

3 制御系設計

最適制御では可制御な制御対象に対して、評価関数

$$J = \int_0^{\infty} (x(t)^T Q x(t) + u(t) R u(t)) dt \quad (6)$$

を最小化するように、状態フィードバックゲイン K を定める。ただし、 Q と R は、適当な重み行列である。このとき K は、

$$K = -R^{-1} B^T P \quad (7)$$

によって与えられる [3]。ここで P は、リッカチ方程式

$$PA + A^T P - PB R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (8)$$

の正定対称解である。本研究では、重み行列 Q , R を試行錯誤によって、車体にあたる z_s が徐々に変化をするよう、

シミュレーションにより決定した。その結果、 Q , R を、

$$Q = \text{diag}[1000 \ 750 \ 300 \ 70], \quad (9)$$

$$R = 0.022 \quad (10)$$

と定めた。このときの状態フィードバックゲイン K は、

$$K = [-22.8579 \ -182.7306 \ 1246.5406 \ 17.7276] \quad (11)$$

である。

4 シミュレーションと実験

第 3 章で求めた状態フィードバックゲイン K を用いて、振幅 0.02[m], 周波数 0.33[Hz] の矩形波を $d = \dot{z}_r$ に加えたとき、 z_s の一回微分 \dot{z}_s のシミュレーションと実機実験の結果を、図 4 に載せる。

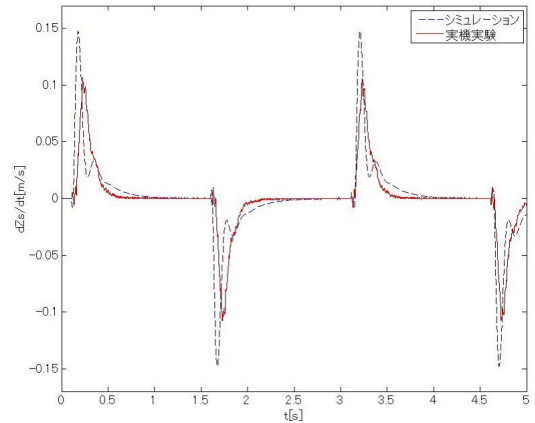


図 4 \dot{z}_s (車体の振動速度) の様子

図 4 から、変位 z_s が徐々に変化していることがわかり、振動の抑制ができていると考える。しかし、シミュレーションと実機実験の結果で大きく差がでた。その理由として、変位 z_s が徐々に変化するように、重み行列 Q , R を調節した結果、操作量 F_c が増加して、モータでの摩擦や逆起電力が無視できなくなったからだと考える。

5 おわりに

本研究では、アクティブサスペンションを模した実験装置に対して、最適制御を行った。具体的には、システム同定でパラメータを決定し、試行錯誤で定めた重み行列 Q と R から、状態フィードバックゲイン K を求め、シミュレーションと実機実験を行った。今後の課題は、アクチュエータのモータのシステム同定を行うこと、LMI を用いて不確かなパラメータであるバネ係数やダンパ係数に対する、ロバスト安定な制御器を設計することである。

参考文献

- [1] Quanser: *User Manual Active Suspension Experiment Set Up and Configuration*
- [2] Quanser: *Active Suspension Laboratory Guide*
- [3] 川田昌克:『MATLAB/Simulink による現代制御入門』、森北出版、東京、2011