

乗り心地向上を図るアクティブサスペンションの ロバスト H_∞ 制御器

2014SC084 土屋 祐樹

指導教員：陳 幹

1 はじめに

ISO2631[1]には、車体重心の上下加速度が搭乗者の乗り心地に影響すると定義されている。これより、車体重心の上下加速度の抑制することで乗り心地を向上することを目的とした研究を進める。本研究では、性能の変化を変動パラメーターとして考慮したロバスト性を保証する制御器設計を行い、車体を制御することで車体重心の上下加速度を抑えることを目標としている。人体に影響を与えるサスペンション部分とタイヤ部分の定数を変動パラメーターとして考慮する際の取扱い方に焦点を当てた。今回、路面を模した凹凸を \sin 波と考慮するため、ロバスト性を保証する H_∞ 制御器を線形行列不等式 (LMI) を用いて作成し、車体重心の上下加速度を抑え、乗り心地の改善を図る。また、シミュレーション及び実験を行い、設計した制御器の効果の有用性を示していく。

2 モデリング

2.1 制御対象

文献 [2] を参考に使用したモデルを図 1 に示す。また、クォーターカーモデルのパラメーターを表 1 に示す。

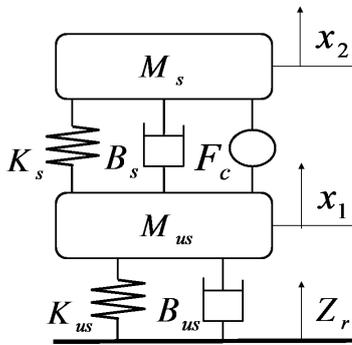


図 1 クォーターカーモデル

表 1 パラメーター

M_s	車体重量	[kg]
M_{us}	タイヤ重量	[kg]
K_s	車体-タイヤ間のバネ定数	[N/m]
K_{us}	タイヤ-路面間のバネ定数	[N/m]
B_s	車体-タイヤ間ダンパの減衰係数	[Ns/m]
B_{us}	タイヤ-路面間ダンパの減衰係数	[Ns/m]

2.2 状態空間表現

路面からの変位 Z_r 、タイヤの変位 $x_1(t)$ 、車体の変位 $x_2(t)$ と定め、状態変数 $x(t)$ 、出力 $y(t)$ 、外乱 $w(t)$ 、アクチュエーターからの制御入力 $u(t)$ を以下に示す。

$$x(t) = [x_1(t) - x_2(t) \quad x_2(t) \quad Z_r(t) - x_1(t) \quad x_1(t)]^T \quad (1)$$

$$y(t) = [x_1(t) - x_2(t) \quad \ddot{x}_2 \quad F_c] \quad (2)$$

$$w(t) = \dot{Z}_r \quad (3)$$

$$u(t) = F_c \quad (4)$$

以下の状態空間表現を導出した。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1w(t) + B_2u(t) \\ y(t) = Cx(t) + D_1w(t) + D_2u(t) \end{cases} \quad (5)$$

3 制御器設計

3.1 行列ポリトープ表現

パラメーターの不確かさを取り扱う際に行列ポリトープ表現を使用した [3]。変動パラメーターである B_s 、 B_{us} の変動範囲を以下と定める。

$$B_s \in [\min, \max] (:= [B_{s \min}, B_{s \max}]) \quad (6)$$

$$B_{us} \in [\min, \max] (:= [B_{us \min}, B_{us \max}]) \quad (7)$$

この変動範囲から 4 つの端点を次のよう定めた。

$$\begin{aligned} & (B_{s \min}, B_{us \min}), (B_{s \min}, B_{us \max}) \\ & (B_{s \max}, B_{us \min}), (B_{s \max}, B_{us \max}) \end{aligned}$$

閉ループシステムをロバスト安定化する状態フィードバックゲイン K を設計するにあたり、変動パラメーターとして扱う B_s 、 B_{us} を含む行列 A 、 B_1 、 C を端点毎の行列 A_i 、 B_{1i} 、 C_i とし、状態フィードバック $u = Kx(t)$ を施した閉ループシステムの状態方程式を次式 (8) で表す。

$$A_{cl,i} = A_i + B_2K, \quad C_{cl,i} = C_i + D_2K \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

$$G(s) \begin{cases} \dot{x}(t) = A_{cl} x(t) + B_1 w(t) \\ z(t) = C_{cl} x(t) + D_1 w(t) \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (8)$$

3.2 H_∞ 制御器 [3]

本研究では、LMI を用いた H_∞ 制御器設計を行った。状態フィードバック制御 ($u(t) = Kx(t)$) を行うに当たり、評価出力 $z(t)$ を $z(t) = y(t) = [x_1(t) - x_2(t) \quad \ddot{x}_2 \quad F_c]$ とし、閉ループシステムの状態方程式表現は次式で表わす。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bw(t) \\ z(t) = Cx(t) + Dw(t) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A+B_2K & B_1 \\ C+D_2K & D_1 \end{bmatrix}$$

H_∞ 制御器設計のための LMI 条件は,
 $minimize : \gamma$

$$\begin{bmatrix} AX+B_2Y+XA^T+Y^TB_2^T+B_1B_1^T & & \\ & C_1X+D_2Y+D_1B_1^T & \\ & & D_1D_1^T-\gamma^2I \end{bmatrix} \prec 0$$

と表される。ただし, LMI の (1,2) 成分 * は (2,1) 成分の対称行列である。上記の LMI を満たす X, Y が存在するとき, H_∞ 性能を満足する状態フィードバックゲイン $K=YX^{-1}$ を得ることが出来る。

4 シミュレーション

変動範囲の 4 端点とノミナル値の 5 つを比較し, 優れた結果を得られた最悪状況を考慮した場合のコントローラーと行列ポリトープ表現を用いて変動範囲の全てをカバーするコントローラーの比較を行った。振幅 $\pm 0.002[m]$, 周波数 $3[Hz]$ の \sin 波上の路面を 3 秒間走行することを想定し, 挙動の変化を観察する。min,min は最悪状況を想定したコントローラー, Polytope は行列ポリトープ表現を用いたコントローラーの挙動を示す。車体重心の上下加速度のシミュレーション結果とその拡大図を図 2, 3 に示す。図 2, 3 より, 最悪状況を想定したコントローラーの方が上下加速度の振幅を抑えられている。よって, 本研究では最悪状況を想定した制御器設計を行うことで優れた結果を得ることが出来た。

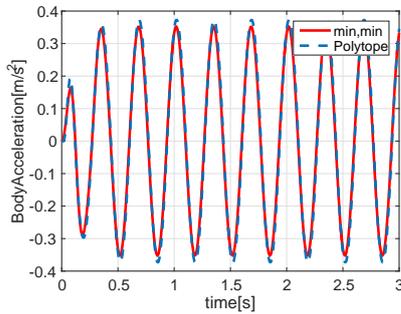


図 2 車体重心の上下加速度

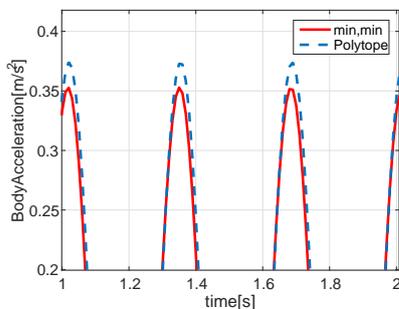


図 3 図 2 の拡大図

5 実験

設計した制御器を実験機に搭載した際の挙動を確認した。min,min が最悪状況を考慮したコントローラー, Passive が制御無しを表す。シミュレーションと同様の条件下での実験結果を図 4, 図 5 に示す。

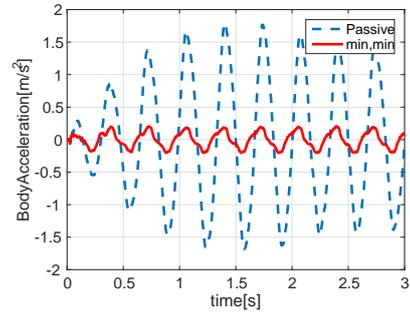


図 4 車体重心の上下加速度

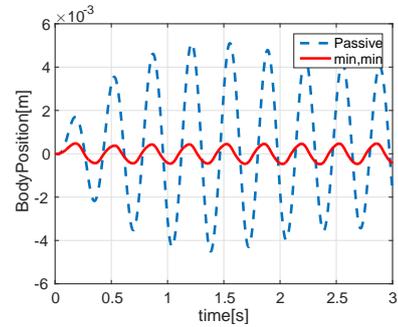


図 5 車体重心の変位

6 おわりに

変動パラメーターを考慮した H_∞ 制御器を LMI を用いて設計した。また, シミュレーション及び実験から作成した制御器の有用性を示した。結果, 変動領域内の最悪状況を考慮した制御器設計をすることで優れた結果を得ることが出来た。今後の課題として, ISO2631 で述べられる周波数特性を考慮した乗り心地評価が挙げられる。

参考文献

- [1] 国際標準化機構 (International Organization for Standardization:ISO) : 『ISO2631』, 1974 年制定
- [2] Quanser : 『USER MANUAL ActiveSuspension Experiment』, 2012.
- [3] 蛸原 義雄 : 『LMI によるシステム制御 ロバスト制御系設計のためのアプローチ』 森北出版, 2012.