

アクティブサスペンションの離散時間制御器設計

2013SE141 西部 優斗

指導教員：高見 勲

1 はじめに

マイクロプロセッサの発展により、演算精度を高め複雑な制御器を容易に扱えることからデジタル制御の必要性は増している。離散時間制御器は自動車の制御ロジックが複雑化する現在、制御器の変更が容易に扱え、自動車に搭載されたコンピュータの制約下で制御性能が確保できる。そこで、アクティブサスペンションでの連続時間制御器と離散時間制御器をシミュレーションで比較した。車体重心の上下加速度を図1に示す。青の破線は連続時間モデルから設計した連続時間制御器 (Continuous), 赤の実線は連続時間制御器をサンプリングタイム 0.06[s] で離散化させた離散時間制御器 (Conventional) である。結果より大きなサンプリングタイムの離散時間制御器では制御性能は悪化する。よって、本研究では大きなサンプリングタイムでも制御性能を保証するために、離散時間モデルを用いて離散時間制御器を設計する。また本研究の制御器にシミュレーションと実験での検証を行う。

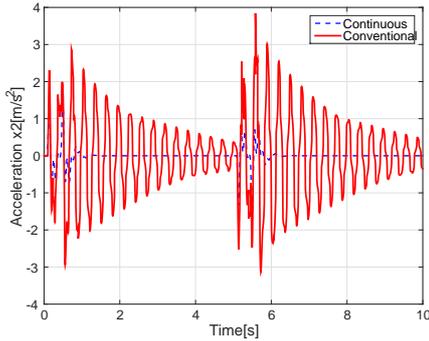


図1 車体重心の上下加速度

2 モデリング

1/2 車体モデルを図2に示す [1]。車体の慣性モーメントを J として、前輪の変位 x_{1f} , 後輪の変位 x_{1r} , 車体の変位 x_2 , 車体のピッチ角 θ についての運動方程式を以下に示す。質量は M , バネは k , ダンパーは c , サフィックスの f は前輪, r は後輪, 1 は車輪, 2 は車体である。

$$M_{1f}\ddot{x}_{1f} = -k_{1f}(x_{1f} - x_{0f}) - c_{1f}(\dot{x}_{1f} - \dot{x}_{0f}) + k_{2f}(x_{2f} - x_{1f}) + c_{2f}(\dot{x}_{2f} - \dot{x}_{1f}) - F_f \quad (1)$$

$$M_{1r}\ddot{x}_{1r} = -k_{1r}(x_{1r} - x_{0r}) - c_{1r}(\dot{x}_{1r} - \dot{x}_{0r}) + k_{2r}(x_{2r} - x_{1r}) + c_{2r}(\dot{x}_{2r} - \dot{x}_{1r}) - F_r \quad (2)$$

$$M_2\ddot{x}_2 = -k_{2f}(x_{2f} - x_{1f}) - c_{2f}(\dot{x}_{2f} - \dot{x}_{1f}) - k_{2r}(x_{2r} - x_{1r}) - c_{2r}(\dot{x}_{2r} - \dot{x}_{1r}) + F_f + F_r \quad (3)$$

$$J\ddot{\theta} = l_f\{-k_{2f}(x_{2f} - x_{1f}) - c_{2f}(\dot{x}_{2f} - \dot{x}_{1f}) + F_f\} - l_r\{-k_{2r}(x_{2r} - x_{1r}) - c_{2r}(\dot{x}_{2r} - \dot{x}_{1r}) + F_r\} \quad (4)$$

状態変数 $x(t)$, 制御入力 $u(t)$, 外乱入力 $w(t)$ を以下に示す。

$$x(t) = [x_{1f} - x_{0f} \quad x_{1r} - x_{0r} \quad x_{2f} - x_{1f} \quad x_{2r} - x_{1r} \quad \dot{x}_{1f} \quad \dot{x}_{1r} \quad \dot{x}_{2f} \quad \dot{x}_{2r}]^T$$

$$u(t) = [F_f \quad F_r]^T \quad w(t) = [x_{0f} \quad x_{0r}]^T$$

以上から、連続時間モデルは以下のように導出できる。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_w w(t) + B_u u(t) \quad (5)$$

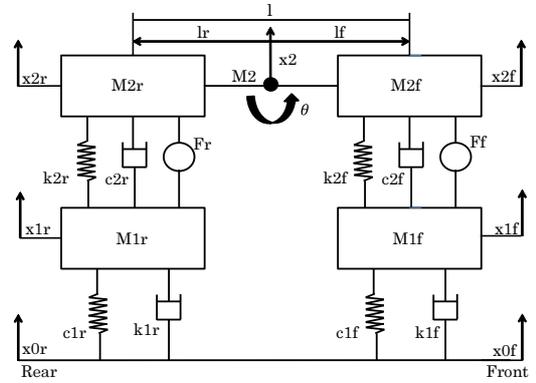


図2 1/2 車体モデル

3 制御器設計

3.1 離散時間モデルの導出

本研究では零次ホールドを用いて連続時間モデルを離散化し制御器を設計する。サンプリングタイムを $T[s]$ として、式 (5) は以下のように離散化される [2]。

$$x[k+1] = A_d x[k] + B_{wd} w[k] + B_{ud} u[k] \quad (6)$$

3.2 評価出力

車体重心の上下加速度 \ddot{x}_2 , ピッチ角加速度 $\ddot{\theta}$, 制御入力 F_f, F_r を評価入力 $z(t)$ として、零次ホールドを用いて離散化すると以下ようになる。

$$z[k] = [\ddot{x}_2 \quad \ddot{\theta} \quad F_f \quad F_r]^T = C_d x[k] + D_d u[k] \quad (7)$$

3.3 LMI 条件

本研究では離散型 H_2 制御の LMI 条件を満たす範囲で γ が最小になるような X, Y を求め、状態フィードバック

ゲイン K_d を導出する。LMI 条件は以下ようになる [3].

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \gamma \\ & \text{subject to} \\ & \begin{bmatrix} -X & (A_d X + B_{ud} Y)^T & (C_d X + D_d Y)^T \\ A_d X + B_{ud} Y & -X & 0 \\ C_d X + D_d Y & 0 & -I^{-1} \end{bmatrix} < 0 \\ & \begin{bmatrix} Z & B_{wd}^T \\ B_{wd} & X \end{bmatrix} > 0 \\ & \text{trace}(Z) < \gamma^2 \end{aligned}$$

この LMI 条件を満足する X, Y が存在するとき閉ループ系は漸近安定である。導出する状態フィードバックゲイン K_d は $K_d = YX^{-1}$ として求められる。

4 シミュレーション・実験

振幅 $0.01[m]$ のパルス波を外乱入力として与え、 $30[km/h]$ で走行したときを想定してシミュレーション・実験を行う。制御対象 $P(s)$ は連続時間で動作し、制御器は離散時間で動くことからサンプラホールドでそれぞれの時間領域を補完するシステムを構成する。図 3 にシステムの構成を示す。 S はサンプラ、 H はホールドである。

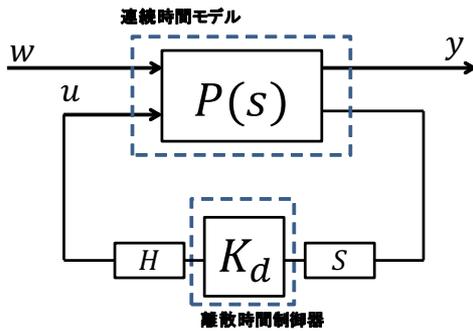


図 3 システムの構成

4.1 シミュレーション

サンプリングタイムが $0.06[s]$ のときの車体重心の上下加速度 \ddot{x}_2 を図 4 に示す。青の破線は連続時間モデルでの連続時間制御器を離散化した離散時間制御器 (Conventional), 赤の実線は本研究の離散時間制御器 (Proposed) である。図 4 より, Proposed は Conventional に比べピーク値と収束時間が改善された。また, サンプリングタイムが $0.06[s], 0.08[s], 0.1[s]$ での車体重心の上下加速度 \ddot{x}_2 の比較を図 5 に示す。図 5 より, 本研究の制御器では $0.1[s]$ のときには制御性能は改善されない。そのためサンプリングタイムが設定できる限界が $0.08[s]$ である。また図 5 の比較から, サンプリングタイムが $0.06[s]$ のときの制御器を実験機に実装し実験を行う。

4.2 実験

図 6 に車体重心の上下加速度の実験結果とシミュレーションとの比較を示す。図 6 より, ピーク値は改善されているが収束時間は一致している。以上より, 本研究の制御器は実験においても有用性を示した。

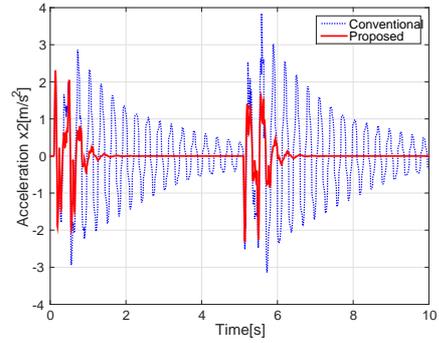


図 4 $0.06[s]$

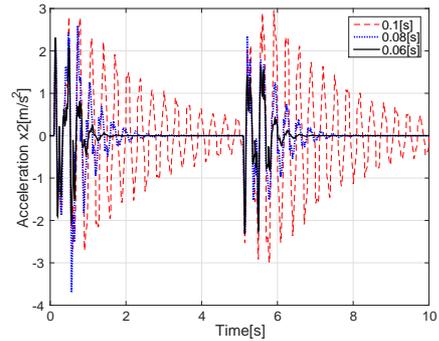


図 5 サンプリングタイムごとの比較

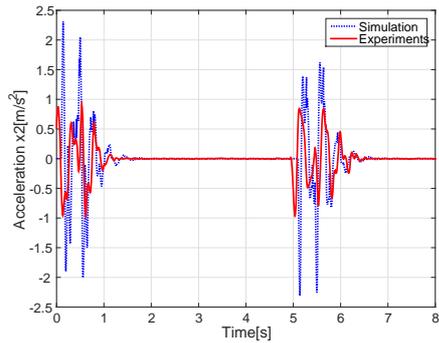


図 6 車体重心の上下加速度

5 おわりに

本研究の制御器によってサンプリングタイムを $0.08[s]$ まで大きくしても制御性能を改善できた。

参考文献

- [1] Kohei Suzuki, Tatsuo Toda, Gan Chen, Isao Takami, "Robust H_2 Control of Active Suspension - Improvement of Ride Comfort and Driving Stability-", IEEE Multi-Conference on Systems and Control, p1951-1956, 2015.
- [2] 萩原朋道, " デジタル制御入門", コロナ社, p5-6, 1999.
- [3] 蛭原義雄, "LMI によるシステム制御 ロバスト制御設計のための体系的アプローチ", 森北出版, p137-139, 2012.