

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	拡張等価入力外乱手法を用いた制御系の絶対加速度・応答を推定する設計スペクトルの精度検証
Title(English)	A new spectrum for estimating maximum absolute acceleration and control force of extended EID approach
著者(和文)	宮本皓, 佐藤大樹, 陳引力, 余錦華
Authors(English)	Kou Miyamoto, Daiki Sato, Yinli Chen, Jinhua She
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , pp. 903-904
Citation(English)	Summaries of technical papers of annual meeting, , pp. 903-904
発行日 / Pub. date	2019, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

拡張等価入力外乱手法を用いた制御系の絶対加速度・応答を推定する設計スペクトルの精度検証

アクティブ制御 制御力スペクトル	等価入力外乱 絶対加速度	応答スペクトル 最大制御力	正会員 同	○宮本皓* 陳引力***	同 同	佐藤大樹** 余錦華****
---------------------	-----------------	------------------	----------	-----------------	--------	-------------------

1. はじめに

制御工学を建築物の振動制御に応用する研究は 1980 年代以降盛んに行われており、近年では従来盛んに用いられて LQR 制御の他に、筆者らを中心として、外乱の影響を推定し、それを制御に用いる等価入力外乱手法（以下、EID 手法）も応用されている（例えば 1)~3)）。従来の EID 手法はメカトロニクスの制御を対象としたため建築物の振動制御に重要である絶対加速度を考慮できていなかった。これを受け筆者らは絶対加速度を制御できるように本手法を拡張した 4)。

一方、制御対象によって「制御のしやすさ」が異なるため、予め制御しやすい建築物を設計しておくことで、より効率よく振動制御を行うことが可能である。陳ら 5)や小檜山ら 6)は、アクティブ制御を用いることで見かけの減衰が変わることに着目し、応用スペクトルを用いてアクティブ制御を用いた建築物の応答や、必要な最大制御力を見積もる手法を提案した。

さらに、この陳ら、小檜山らの方法を、EID 手法を用いた制御系の最大絶対加速度と最大制御力を見積もるように筆者らは拡張を行った 7)。

しかし、検証に用いた地震波は 2 波のみであった。本論文では様々な地震波を用いて文献 7)で提案したスペクトルの検証を行う。

2. 等価入力外乱

建築物の運動方程式は状態方程式を用いて式(1)により表される。

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + B_d d(t) \tag{1}$$

ただし、

$$\begin{cases} z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}, & A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ E_u \end{bmatrix}, & B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \\ d(t) = \ddot{x}_g(t) \end{cases} \tag{2}$$

となる。ここで、 m は質量、 $x(t)$ は変位、 k は剛性、 c は減衰係数、 $x_g(t)$ は地動変位を示し、 E_u は制御入力が入る場所を意味し、1 自由度系の場合は $E_u=1/m$ である。一般的に $B \neq B_d$ であり、外乱 $d(t)$ と制御入力 $u(t)$ が入力される「場所」は異なるため、外乱そのものではなく、外乱と同じ応答を与える制御入力チャンネル B における信号を推定することが望ましい。等価入力外乱とは、制御入力チャンネルにおける信号で、オリジナルの外乱と同じ応答を与える信号である。従って、この信号を推定し、その逆位相を用いることで外乱による応答を低減できることが期待される。この等価入力外乱を推定する推定器を持つ制御系の、外乱（地動加速度）から、状態 $z(t)$ （つまり、相対変位と相対速度）までの伝達関数は図 1 にて示される。図中において K_p はコントローラゲインであり LQR などにより設計される。 $F(s)$ はローパスフィルターを表し、下記の式により与えられる。

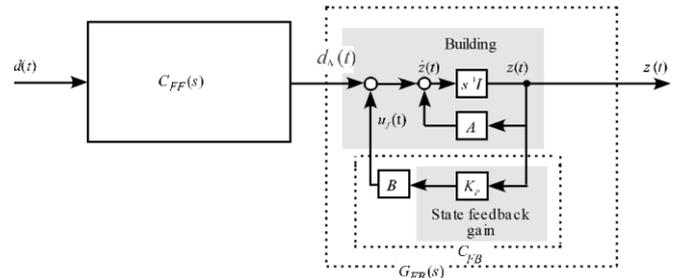


Fig. 1 Block diagram of transfer function from disturbance to state

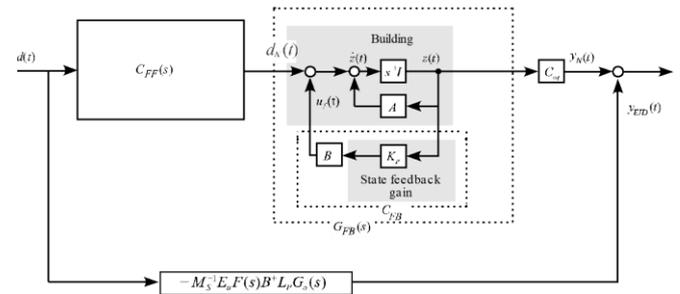


Fig. 2 Block diagram of transfer function from disturbance to absolute acceleration

$$F(s) = \frac{N_F}{\Omega s + 1} \tag{3}$$

ここで、 Ω はカットオフ周波数(rad/s)であり、 N_F は 0~1 の実数であり、制御力を調節するのに用いられる。

B^+ は B の擬似逆行列であり、式(3)により与えられる。

$$B^+ = (B^T B)^{-1} B^T \tag{3}$$

$C_{FF}(s)$ はフィードフォワード制御部分であり、

$$C_{FF}(s) = B_d - BF(s)B^+ L_p G_o(s) \tag{4}$$

により与えられる。ここで、 L_p はオブザーバゲインであり、 $G_o(s)$ は状態を推定するオブザーバの伝達関数である。

一方、地動加速度から絶対加速度までの伝達関数は図 2 により与えられる。図 2 から分かるように、絶対加速度までの制御こうおうは、変位や速度までとは異なり、外側から、 $BF(s)B^+ L_p G_o(s)$ を経由するループを持つことがわかる。

3. 絶対加速度と制御入力を推定する応答スペクトル

この制御系の最大絶対加速度を推定するスペクトル $S_{A,EID}(h_{eq}, \omega)$ は文献 7)により式(5)により与えられる。

$$S_{A,EID}(h_{eq}, \omega) = (ABS_{AC} + RSS_{AC}) / 2 \tag{5}$$

ここで

$$ABS_{AC} = \{S_{A,N}(h_{eq}, \omega) + |y_{EID}(t)|_{\max}\} / 2 \tag{6}$$

$$RSS_{AC} = \sqrt{S_{A,N}(h_{eq}, \omega)^2 + |y_{EID}(t)|_{\max}^2} \tag{7}$$

なお、 $y_{EID}(t)$ は等価入力外乱を用いることによって生じた加速度であり、式(8)によって与えられる。

$$|y_{EID}(t)|_{\max} = |\tilde{d}_e(t)/m_s|_{\max} \approx N_F |d_e(t)/m_s|_{\max} = N_F |\ddot{x}_g(t)|_{\max} \quad (8)$$

次に、最大制御力の推定方法を述べる。制御力は式(9)にて与えられる。

$$u(t) = u_f(t) - \tilde{d}_e(t) \quad (9)$$

ここで、 $u_f(t)$ はフィードバック制御力であり、 $\tilde{d}_e(t)$ は推定等価入力外乱である。推定等価入力外乱の最大値は式(8)より下記の式(10)で与えられる。

$$|\tilde{d}_e(t)|_{\max} \approx N_F |m_s \ddot{x}_g(t)|_{\max} \quad (10)$$

一方、フィードバック制御力の最大値を見積もる制御カスペクトルはフィードバック制御を施すことで見かけの減衰係数が初期減衰 h から h_{eq} に変化することを利用して式(11)により与えられる。

$$U(h_{eq}, \omega) = K_{P,2} S_V(h_{eq}, \omega) \quad (11)$$

ここで、 $K_{P,2}$ はフィードバックコントローラゲインのうち、速度に依存する項目であり、 $S_V(h, \omega)$ は減衰定数 h に対する速度応答スペクトルである。従って、拡張等価入力外乱を用いた制御系の最大制御力を推定するスペクトルは式(12)により与えられる。

$$U_{EID}(h_{eq}, \omega) = (ABS_U + RSS_U) / 2 \quad (12)$$

ここで

$$ABS_U = \left\{ U(h_{eq}, \omega) + |\tilde{d}_e(t)|_{\max} \right\} / 2 \quad (13)$$

$$RSS_U = \sqrt{U(h_{eq}, \omega)^2 + |\tilde{d}_e(t)|_{\max}^2} \quad (14)$$

式(12)の両辺を建物の重量で除すことにより、制御力せん断力係数スペクトル $S_{C,EID}(h_{eq}, \omega)$ が式(15)により与えられる。

$$S_{C,EID}(h_{eq}, \omega) = U_{EID}(h_{eq}, \omega) / (mg) \quad (15)$$

4. 数値例

3章で説明した最大絶対加速度と制御力を見積もるスペクトルの妥当性の検証を4章で行う。

本報では、初期減衰 $h = 0.02$ の建築物を対象として制御系のオブザーバ $G_o(s)$ の固有周期 f_o を 10Hz とし、減衰定数は 0.8 とした。また、フィードバックコントローラゲイン K_P は $h_{eq} = 0.4$ となるように設計した。また、制御対象の地震波は FEMA⁸⁾ の Far Field に登録されている 22 種の地震波を用いて検証を行った。なお、1 種類の地震波には 2 波ずつ観測されているため、合計で 44 波の地震波を用いた。検証対象となる建築物は固有周期を 0.5 s から 5.0 s まで、0.5 s ずつ変化させていき、11 個のモデルを用いた。図 3 と 4 に解析結果を示す。

図 3 は式(5)による最大絶対加速度値の推定値と、解析値 (RHA: Response History Analysis) (真値) の比較を示し、図 4 は式(12)による最大制御力の推定値と解析値の比較を示した。また、図中において破線は 20% 誤差を示す。図 3 中の × は集集地震波の TCU045-E、及びを入力した際の結果であり、○ はその他の地震波の結果である。この結果より、加速度に対する誤差は特定の地震波に対してのみ精度が落ちる傾向があることが分かる。

一方、図 4 は制御力のせん断力係数の値を示したものであり、制御対象の固有周期ごとに記号を変更してある。図 4 の結果より、地震波よりも、制御対象の固有周期の影響が大きいことが分かる。

5. まとめ

本論文では拡張等価入力外乱手法をもつ制御系を対象とし

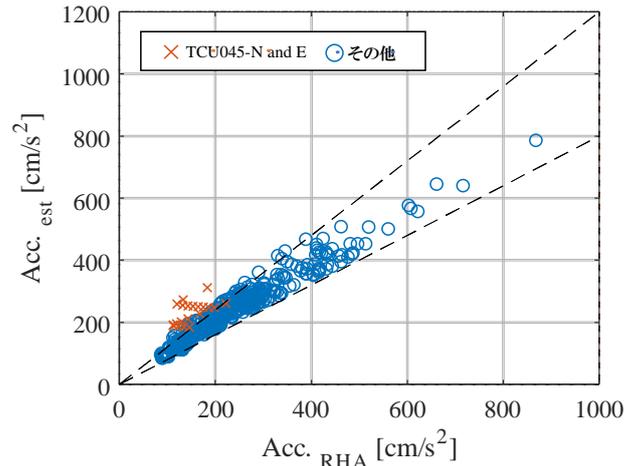


Fig. 3 Analysis and estimate (Acceleration)

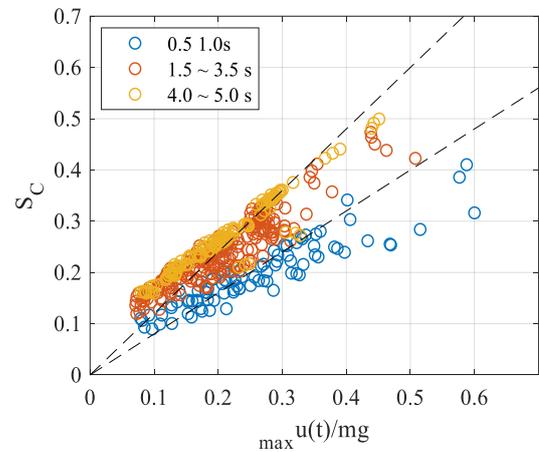


Fig. 4 Analysis and estimate (control force)

て、地震波に対する最大絶対加速度と制御力を見積もれるスペクトルの検証を行った。本報の結果より、絶対加速度の推定は特に一部の地震波で推定精度が悪化する傾向があるのに対し、制御力に関しては、制御対象の固有周期によって推定精度が変わる傾向があることが明らかになった。

参考文献

- 1) Kou Miyamoto et al. Equivalent-input-disturbance approach to active structural control for seismically excited buildings, ELSEVIER, Engineering Structures, Vol. 125, pp. 329-399, 2016
- 2) Jinhua She et al. Active structural control with input dead zone based on equivalent-input-disturbance approach, 36th annual conference on IEEE industrial electronics society (IECON 2010), pp. 47-52, 2010
- 3) Mingxing Fang et al. Active Structural control based on Integration of H_∞ control and equivalent-input-disturbance approach, J. of Advanced computational intelligence and infomatics. Fuji Technology press LTD, Vol. 20, No. 2, pp. 197-204, 2015
- 4) 宮本皓 他, 建築構造物のアクティブ制御に適した等価入力外乱手法の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 84, No. 757, 2019
- 5) 陳引力 他, フィードバック制御を対象とした制御力予測スペクトルの提案, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 341-344, 2019
- 6) 小椋山雅之 他, PD 制御アクティブブレースを有する多層建物の設計用応答スペクトルを用いた構造系・制御系の同時最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 77, No. 675, pp. 715-722, 2012
- 7) 宮本皓 他, 拡張等価入力外乱手法の応答・制御力評価のための新しいスペクトル, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 329-332, 2019
- 8) Federal Emergency Management Agency: Quantification of building seismic performance factors, FEMA P695, 2009.6

*清水建設, (元・東京工業大学), 博士 (工学)

**東京工業大学, 准教授, 博士 (工学)

***東京工業大学, 大学院生, 修士 (工学)

****東京工科大学, 教授, 博士 (工学)

*Simizu corporation, (Former Tokyo Institute of Technology), Dr. Eng.

**Tokyo Institute of Technology, Assoc. Prof., Dr. Eng.

***Tokyo Institute of Technology, Graduate student.

****Tokyo University of Technology, Prof., Dr. Eng.