T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

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)	
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

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

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 かや小檜山らのは, 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れるように筆者 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,

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

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。 $B^+ = (B^T B) B^T$ (3)

$$C_{FF}(s)はフィードフォワード制御部分であり,C_{FF}(s) = B_d - BF(s)B^+L_pG_o(s)$$
(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。

つ方,地動加速度から絶対加速度までの伝達関数に図2に より与えられる。図2からも分かるように、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、 $BF(s)B^+L_pG_o(s)$ 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

3. 祀刈加速度と前御八刀を推定9 る心台へハントル この判御 気の長十 絶対加速 度を 推定する スペノ

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

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

$$(5)$$

$$Z \subset \mathcal{O}$$

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

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

$$(7)$$

なお, yen(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。

A new spectrum for estimating maximum absolute acceleration and * H control force of extended EID approach **

** Daiki Sato

^{*} Kou Miyamoto

^{***} Yinli Cheng

^{****} Jinhua She

$$\left| y_{EID}(t) \right|_{\max} = \left| \tilde{d}_{e}(t) / m_{S} \right|_{\max} \approx N_{F} \left| d_{e}(t) / m_{S} \right|_{\max} = N_{F} \left| \ddot{x}_{g}(t) \right|_{\max}$$
(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。

(9)

 $u(t) = u_f(t) - d_e(t)$

ここで, $u_f(t)$ はフィードバック制御力であり, $d_s(t)$ 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。

$$\left|d_{e}(t)\right|_{\max} \approx N_{F} \left|m_{S} \ddot{x}_{g}(t)\right|_{\max}$$
⁽¹⁰⁾

一方、フィードバック制御力の最大値を見積もる制御力ス 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 heqに変化することを利用して式(11)によ り与えられる。

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

ここで, K_{P2} 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、Sr(h,w)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。

$$U_{ED}(h_{eq},\omega) = (ABS_U + RSS_U)/2$$
(12)
 $\simeq \simeq \sqrt[-\infty]{}$

$$ABS_{U} = \left| U(h_{eq}, \omega) + \left| \tilde{d}_{e}(t) \right|_{\max} \right|^{2}$$
(13)

$$RSS_U = \sqrt{U(h_{eq}, \omega)^2 + \left| \tilde{d}_e(t) \right|_{\max}^2}$$
(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 Sc,EID(heq,ω)が式(15)により与えられる。

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

4. 釵値例

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 Go(s)の固有周期 fo 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。

-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
- Jinhua She et al. Active structural control with input dead zone based on 2) equivalent-input-disturbance approach, 36th annual conference on IEEE industrial electronics society (IECON 2010). pp. 47-52, 2010
- Mingxing Fang et al. Active Structural control based on Integration of H_{∞} control 3) and equivalent-input-disturbance approach, J. of Advanced computational intelligence and infomatics. Fuji Technology press LTD, Vol. 20, No. 2, pp. 197-204, 2015
- 宮本皓 6 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 日本建築学会構造系論文集, Vol. 84, No. 757, 2019 4) 提案,
- 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 5) 陳引力 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 341-344, 2019 提案,
- 小檜山雅之 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 スを有する多層建物の設計用 6) 道系論文集, Vol. 77, No. 675, pp. 715-722, 2012 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
- 7) スペクトル,日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 329-332, 2019
- Federal Emergency Management Agency: Quantification of building seismic 8) 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.