

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	絶対加速度制御に注目した等価入力外乱手法によるアクティブ制御
Title(English)	
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 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 389-392
Citation(English)	, , , pp. 389-392
発行日 / Pub. date	2018, 3

絶対加速度制御に注目した等価入力外乱手法によるアクティブ制御

構造—振動

正会員 ○宮本皓^{*1}
〃 陳引力^{*3}正会員 佐藤大樹^{*2}
〃 余錦華^{*4}

アクティブ制御, 等価入力外乱, 絶対加速度

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降, 建築物の倒壊を防ぐだけでなく, 損傷も最小限にする目的として免震構造を導入する件数が激増してきている¹⁾。

一方, 更なる振動制御性能を得るために, 制御工学を応用したアクティブ制御が, 日本のみならず, 世界中の建築物にも適用されている²⁾。建築物のアクティブ制御に関して, 現在に至るまで様々な制御手法が応用されており, 従来の古典制御理論や現代制御理論³⁾に留まらず, H_∞ 制御⁴⁾や予見制御⁵⁾などを応用した研究も行われており, 建築物のアクティブ制御の技術は時代と共に大きな躍進を見せている。しかし, これらの研究は, 主に1自由度制御系であった(制御工学でいう自由度は構造動力学における自由度とは異なり, 制御対象のモード次数ではなく, 信号のカテゴリと密接な関係がある。システムにおける信号は基本的に2種類に分かれており, 目標入力, 外乱やノイズのような外生信号と, 出力や状態などのようなシステム内部の計測信号である。それらの信号を何かの形で1つにまとめた後のものをもとに制御系を設計すると, 制御系は1自由度となるが, 一方, 2つのカテゴリの信号を別々に制御するように制御系を構築すると, 制御系は2自由度となる。)。Sheらにより提案された等価入力外乱手法^{6), 7)}(EID: equivalent input disturbance)は2自由度の制御系であり, 従来の1自由度制御系に比べ, よりよい制御性能が得られることが期待される。

等価入力外乱手法を用いた建築物のアクティブ制御に関する既往研究では, Sheらにより不感帯が存在する場合の制御効果が検討された⁸⁾。その結果, 制御入力に不感帯がある場合においても, 等価入力外乱手法は, 従来から用いられている最適制御より, 相対変位と相対速度に関して, よりよい制御性能が得られることが示された。さらに, Miyamotoらにより, 等価入力外乱推定器に用いられるローパスフィルターの設計法の提案や, 等価入力外乱手法を用いた際の周波数特性改善に関する検討, さらに, 制御入力エネルギーについての考察が行われた⁹⁾。その結果, 制御系設計の際に用いられるローパスフィルターの分子項を調節することにより, 制御入力の大きさを調節可能であることが明らかになった。さらに, 等価入力外乱推定器を取り付けることにより, 特に高層建築物の振動制御で重要な低周波数帯域における応答を改善することが明らかになった。Sheらの研究とMiyamotoらの研究では, 等価入力外乱手法を用いることにより, 従来の最適制御よりも相対変位, 相対速度, 絶対加速度を抑えることが可能であることが示されており, 等価入力外乱手法による建築物の振動制御が可能であることが示された。

等価入力外乱手法はメカトロニクス系を対象とした制御方法として提案され, 基本的に制御対象の変位と速度に着目している。SheらとMiyamotoらの研究も, 建築物の相対変位と相対速度の制御を主眼に置くものであった。しかし, 建築物の振動制御では, 絶対加速度を抑えることも重要である。それにもかかわらず, 以上の既往研究では絶対加速度は考慮されていなかった。そのため, 絶対加速度に対する制御性能の保証はなく, 同様の制御系を用いても, 相対変位は抑制できても, 絶対加速度は増大する恐れがある。また, 既往研究において, メカトロニクスシステムの制御系設計は主に相対系に着目をして開発を行っていることから, 絶対系の絶対加速度を制御するには, 新たな工夫が必要である。

本論文では, 相対変位のみならず絶対加速度も同時に制御することを主眼にした拡張等価入力外乱手法(EEID: Extended EID)を検討し, それを用いた制御系の再構築を行い, 建築物の振動制御により即した制御系の構築を試みる。

2. 検証用モデル

本論文では以下の図1に示す1自由度系のモデルを検証用モデルとして選定する。

多自由度系を対象として制御系を設計した場合, 制御装置の場所に自由度が存在し制御性能に影響を与える。特に, 後述の通り, 本制御系では, 等価入力外乱の推定には, 制御装置の位置に関する行列(B)を用いていることから, その選定が大きく制御性能に影響を与える。本論文は, それらの影響を除外するために, 図1に示すせん断型の1自由度の検証用モデルを用いる。

このとき, 図1の運動方程式は以下の式(1)によって表される。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) + u(t) \quad (1)$$

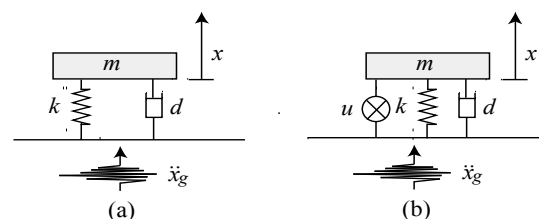


Fig. 1 SDOF model: (a) Without active control and (b) With active control

3. 等価入力外乱

本章では, 等価入力外乱の説明を行う。3.1節では既存の等価入力外乱手法の定義を説明し, 3.2節では絶対加速度を制御する新しい等価入力外乱手法の定義を説明する。

まず、式(1)による建築物の運動方程式を以下のように表される状態方程式に変換する。

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + B_d d(t) \quad (2)$$

ただし、ここで

$$\begin{cases} z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}, & A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{d}{m} \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix}, & B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \\ d(t) = \ddot{x}_g(t) \end{cases} \quad (3)$$

となる。

3.1 従来の等価入力外乱手法

等価入力外乱とは、出力において実際の外乱と同じ効果をもたらす制御入力チャンネルにおける信号のことである。

従来の等価入力外乱手法を用いた制御系は、状態に含まれている相対変位や相対速度を出力とし、

$$y(t) = Cz(t) \quad (4)$$

と表せる。ここで、 C は出力行列を表し、物理的にはセンサーの位置を意味し、全ての状態が直接観測可能な場合は、単位行列になる。なお、一般性を失うことなく、 (A, B) は可制御、 (A, C) は可観測であるとする。

図 1(a)のような制御対象において、外乱 $d(t)$ に対する制御対象の状態を $z(t)$ とし、出力を $y(t)$ とする。それに対して、等価入力外乱 $d_e(t)$ を用いた表現は図 1(b) となる。この時、等価入力外乱が入力した制御対象の状態を $\bar{z}(t)$ とし、出力を $\bar{y}(t)$ とする。

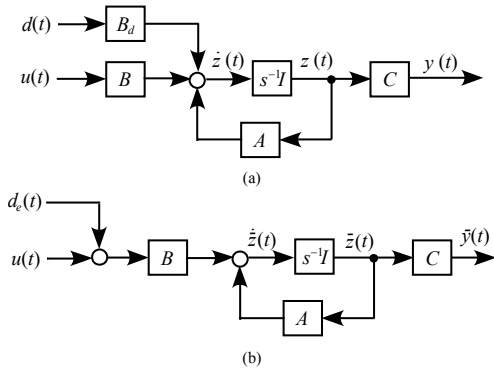


Fig. 2 Concept of EID (a) original plant (b) plant with EID

$\bar{y}(t) = y(t)$ が成り立つとき、 $d_e(t)$ を $d(t)$ の等価入力外乱と呼ぶ。等価入力外乱を推定し、その逆位相の信号を制御に用いることで、外乱による応答を抑制することができる。

3.2 絶対加速度を制御する場合の等価入力外乱

絶対加速度を抑制するような等価入力外乱を推定するには、出力に絶対加速度を含ませるような必要がある。しかし、絶対加速度は制御対象の状態量ではないため、従来の等価入力外乱手法を用いた制御系では絶対加速度を出力として評価するためには何らかの工夫が必要である。本論文では、式(1)に注目し、それを以下のように書き直す。

$$\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) = -\frac{c}{m}\dot{x}(t) - \frac{k}{m}x(t) + \frac{1}{m}u(t) \quad (5)$$

これにより制御対象の状態 $z(t)$ と制御入力 $u(t)$ の組み合わせを用いて絶対加速度が表せることがわかる。したがって、相対変位と絶対加速度を出力する場合、

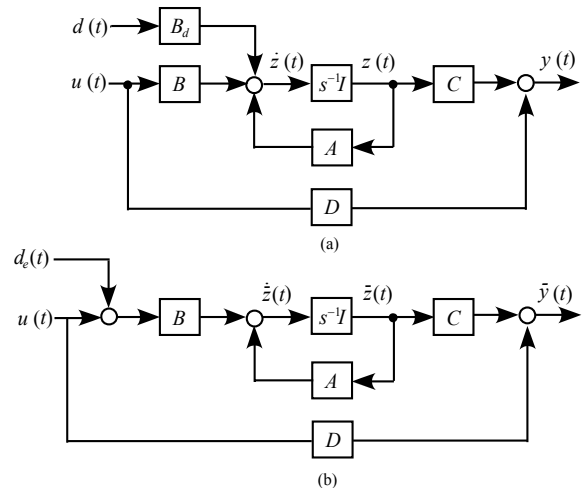


Fig. 3 Concept of new EID (a) original plant (b) plant with EID

$$y = Cz(t) + Du(t) \quad (6)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} \quad (7)$$

と表現できる。この制御対象(図 3(a))に対して、等価入力外乱を持つ等価な制御対象は図 3(b)となる。

4. 絶対加速度制御のための等価入力外乱の推定方法と制御系設計

本章では、絶対加速度が直接制御できる等価入力外乱の推定方法と、それを用いた制御系の構造と設計方法について述べる。

等価入力外乱手法を用いた絶対加速度の制御を陽に考える新しい振動制御システムを図 4 に示す。図中において B^+ は以下により与えられる行列 B の擬似逆行列である。

$$B^+ = \frac{B^T}{B^T B} \quad (8)$$

また、図 4 中の K_p は以下の制御則を持つコントローラゲインである。

$$u_f = K_p z(t) \quad (9)$$

L_p はオブザーバゲインである。

さらに、 $F(s)$ はローパスフィルターであり、式(10)により与えられる。

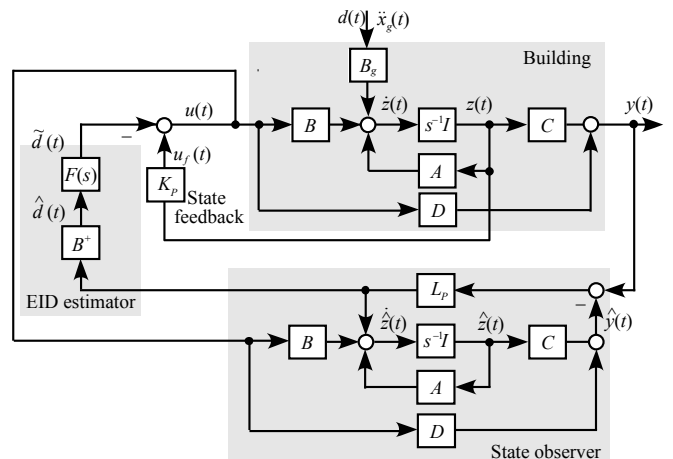


Fig. 4 Configuration of EEID-based active structural control system.

$$F(s) = \frac{N_F}{Ts+1} \quad (10)$$

ただし、ここで s はラプラス変換演算子であり、 T は外乱除去角周波数を選択するパラメータである。また、 N_F は $0 \sim 1$ より選択される関数であり、この値を選択することにより、制御入力の大きさを変更することが可能であることが既往研究より示されている⁹⁾。

以下より、等価入力外乱の推定プロセスの説明を行う。図3に用いられているオブザーバの状態方程式は

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}(t) = A\hat{z}(t) + Bu(t) + L_p C[z(t) - \hat{z}(t)] \\ \hat{y}(t) = C\hat{z}(t) + Du(t) \end{cases} \quad (11)$$

となる。また、等価入力外乱を持つ制御対象

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) + B[u(t) + d_e(t)] \\ y(t) = Cz(t) + Du(t) \end{cases} \quad (12)$$

において、制御対象の状態 $z(t)$ とオブザーバの状態 $\hat{z}(t)$ との差を

$$\Delta z(t) = z(t) - \hat{z}(t) \quad (13)$$

と定義する。

一方、 (A, B) が可制御である仮定より、

$$\dot{\Delta z}(t) = A\Delta z(t) + B\Delta d(t) \quad (14)$$

を満たす $\Delta d(t)$ が存在する。

等価入力外乱の推定値 $\hat{d}(t)$ を以下のように定義する。

$$\hat{d}(t) = d_e(t) - \Delta d(t) \quad (15)$$

式(15)を式(12)、(11)の差分に代入することにより、絶対加速度を制御する等価入力外乱の推定値 $\hat{d}(t)$ は

$$\hat{d}(t) = B^+ L_p C[z(t) - \hat{z}(t)] \quad (16)$$

で与えられる。ここで、 $\hat{d}(t)$ をローパスフィルター $F(s)$ でフィルタリングした後の信号 $\tilde{d}(t)$ を用いる。ただし、ここで、

$$\tilde{D}(s) = F(s)\hat{D}(s) \quad (17)$$

$\tilde{D}(s)$ と $\hat{D}(s)$ は、それぞれ $\tilde{d}(t)$ と $\hat{d}(t)$ をラプラス変換した信号である。

以上より、直達項 D を導入することで、絶対加速度の出力が可能になり、さらに絶対加速度に対する地震波の等価入力外乱の推定が可能になることが明きあらかになった。

5. 数値例

5.1 地震波と構造物モデルの選定

以下の2種類の地震波形を用いて EEID を用いた制御系の解析を行い、文献9)で用いられている EID と比較することにより本手法の有効性を示す。本論文では、周波数応答特性による応答への影響を最小限にするため、コーナー周期が 0.64 s 以降で疑似速度応答スペクトルが一定である人工波である Art Hachinohe 波と、観測波である El-Centro 波を用いた。それぞれの地震波の特性は以下の通りである。

- Art Hachinohe波：コーナー周期 $T_c = 0.64 \text{ s}$ 以降の領域で疑似速度応答スペクトル ρS_v が 100 cm/s ($h = 5.0\%$) となる模擬地震動波形(位相特性：1968Hachinohe EW)
- El-Centro波 (1940, NS)

それぞれの地震波の加速度波形と疑似速度応答スペクトルを図5、6に示した。また、制御対象の諸元をTable1に、制御系設計のためのパラメータをTable2に示す。本論文では、EIDに対してArt Hachinohe波が入力した際の最大相対変位が同等になるようにEEIDのパラメータを設計する。

Table 1. Parameters of SDOF structure

Parameter	Value	Unit
m	1.012×10^4	Kg
k	1.751×10^5	N/m
c	2.066×10^3	N · s/m

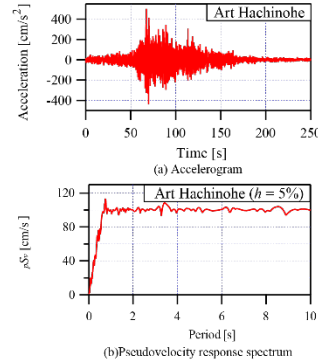


Fig. 5 Art Hachinohe wave

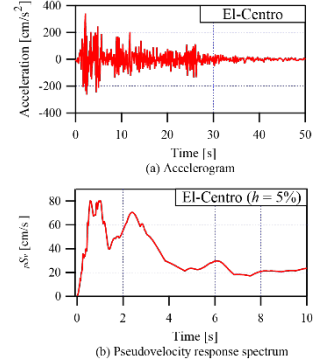


Fig. 6 El-Centro wave

(a) accelerogram and (b) spectrum of pseudo-velocity response

5.2 コントローラゲインとオブザーバゲインの設計

図4のコントローラゲイン K_P は LQR を用いて以下の評価関数を最小化するように設計する。

$$J = \int_0^{\infty} \{z(t)^T Q z(t) + u(t)^T R u(t)\} dt \quad (18)$$

ここで、 $Q > 0$ 、 $R > 0$ の重み関数であり、コントローラゲイン K_P は以下のように与えられる。

$$K_P = -R^{-1} B^T P \quad (19)$$

ただし P は以下のリカッチ方程式を満たす正定対称解である。

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (20)$$

なお、オブザーバゲイン L_p はオブザーバの極 λ_1 、 λ_2 を指定し、指定した極になるように選定する¹⁰⁾。

Table 2. Parameters for design of state-feedback and observer, and low-pass filter

	EEID	EID
State feedback	$Q = 10^{4.5} \times I$, $R_u = 1$	$Q = 10^3$, $R_u = 10$
Observer	$\lambda_{1,2} = -30 \pm 10j$	$\lambda_{1,2} = -20 \pm 20j$
Low-pass filter	$\frac{0.7}{0.05s+1}$	$\frac{0.8}{0.01s+1}$

5.3 時刻歴応答解析

次に、Art Hachinohe 波と El-Centro 波を用いた時刻歴応答解析の結果を示す。図7、8に制御なし(NC)、文献9)で用いた従来の等価入力外乱(EID)、本論文で提案をする絶対加速度を制御する等価入力外乱(EEID)に対する相対変位、絶対加速度と制御入力を示す。図7より、Art Hachinohe 波が入力された際の EID は相対変位を十分に抑えられて

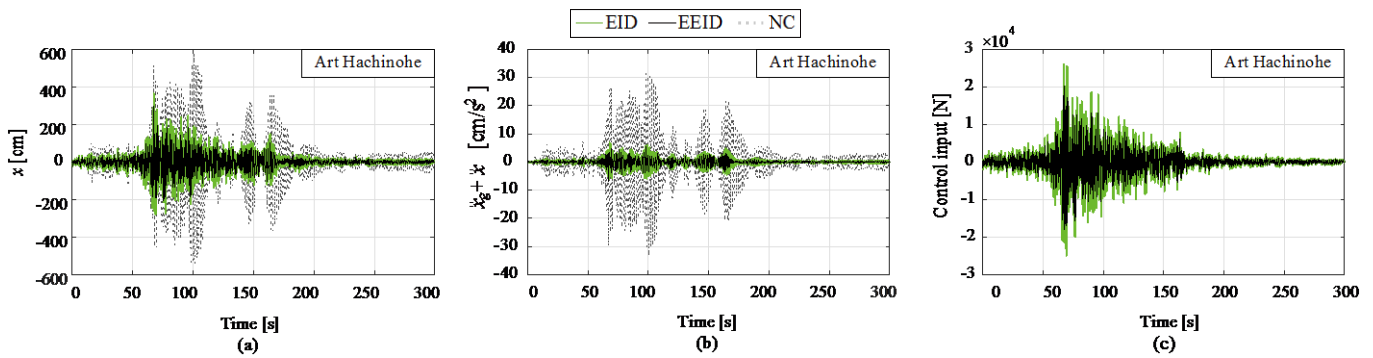


Fig.7 Control system from EID to output.

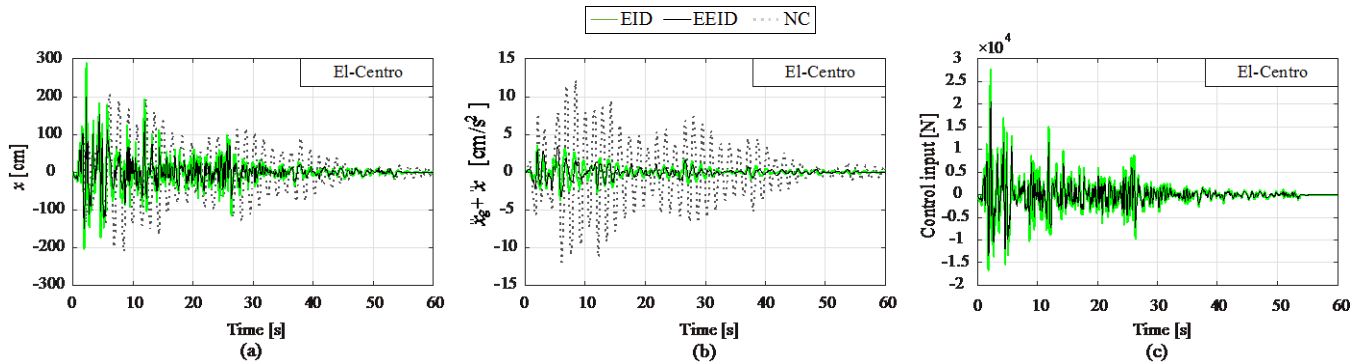


Fig.8 Control system from EID to output.

おり,最大値は7 cm程度になっていることが確認される。また,最大絶対加速度についても EID は制御なしと比較して,最大絶対加速度を4割低減できており,特に,制御なしの際に最も大きく振動する100 sの時の振幅を低減できていることが分かる。一方,EEID はさらに EID と比較をすると,最大相対変位は EID は最大絶対相対変位は同程度であるが,最大絶対加速度は EID よりもさらに2割低減できており,さらに,制御入力の値についても同様に2割程度低減できている。

図7は El-Centro 波に対する応答波形であるが, Art Hachinohe 波と同様に EID は NC と比較して相対変位の応答は非常によく制御できており,最大相対変位については,NC を6割程度抑えていることが分かる。しかし,絶対加速度については,全体的に EID は制御なしよりも応答を低減できているものの,最大絶対加速度は制御無しと比較して4割程度大きくなったことが分かり,従来の EID では,絶対加速度に対して十分な制御性能を持ち合わせていないことが分かった。一方で,EEID は,最大相対変位は EID と同程度に抑えており,さらに,最大絶対加速度については,制御なしよりもわずかに低減できており,さらに, EID と比較して3割程度抑えられており,さらに,最大制御入力も EID と比較して3割低減できていることが分かった。

以上のことから,EEID は従来の相対変位,速度のみを考慮した EID よりも絶対加速度を低減できており,さらに,最大制御入力についても EID よりも低減できており,効率よく振動制御できていることがわかった。

6. まとめ

本論文は従来の,相対変位,速度を制御することを目指した等価入力外乱手法(EID:Equivalent-input-disturbance)を拡張し,絶対加速度と相対変位を抑える新しい等価入力外乱手法(EEID:Extend EID)を提案し,解析により制御効果の比較を行った。本論文で得られた知見を示す。

- ・直達項 D を用いることで,絶対加速度を出力することが可能であり,これにより,絶対加速度を低減する等価入力外乱の推定が可能になる。
- ・数値例より,EEID は EID と比較をして絶対加速度を低減できており,さらに,制御入力にも低減できていることから,EID よりも効率よく振動制御できていることが分かった。

参考文献

- 1) The Japan Society of Seismic Isolation: Recent Trends in Seismic Isolation Buildings, <http://www.jssi.or.jp/menshin/doc/keizoku2.pdf> (in Japanese)
- 2) Spencer Jr B. F., Nagarajaiah S: State of the Art of Structural control, ASCE Structural Engineering 2007; 129: 845-856.
- 3) Guclu R. Sliding mode and PID control of a structural system against earthquake. Math Comput Model 2006; 44 (1-2): 210-7.
- 4) Mechbal N, Nóbrega EGO. Spatial H_∞ approach to damage-tolerant active control. Struct Control Health Monit 2015; 22 (8): 1148-72.
- 5) Mei G, Kareem A, Kantor JC. Model predictive control of structures under earthquakes using acceleration feedback. J Eng Mech 2002; 128 (5): 574-85.
- 6) She J, Fang M, Ohyama Y, Hashimoto H, Wu M. Improving disturbance rejection performance based on an equivalent-input-disturbance approach. IEEE Trans Ind Electron 2008; 55 (1): 380-9.
- 7) She J, Xin X., and Pan Y., Equivalent-Input-Disturbance Approach---Analysis and Application to Disturbance Rejection in Dual-Stage Feed Drive Control System, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 2011, 16 (2): 330-340.
- 8) She J, Sekiya K, Wu M, Lei Q. Active structural control with input dead zone based on equivalent-input-disturbance approach. In: Proc of 36th annual conference on IEEE industrial electronics society (IECON 2010). p. 47-52.
- 9) Miyamoto K, She J, Imani J, Xin X, Sato D. Equivalent-input-disturbance approach to active structural control for seismically excited buildings. Eng Struct 2016; 125: 392-399.
- 10) Kautsky, J., N.K. Nichols, and P. Van Dooren, Robust Pole Assignment in Linear State Feedback, International Journal of Control, 41 ;1985;1129-1155.

*1 東京工業大学 大学院生 博士課程

*2 東京工業大学 准教授・博士 (工学)

*3 東京工業大学 大学院生 修士課程

*4 東京工科大学 教授・博士 (工学)