

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	A new spectrum for designing extended-equivalent-input approach system
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, Ⅰ, , pp. 329-332
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 329-332
発行日 / Pub. date	2019, 3

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

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

建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 PID 制御理論¹⁾に留まらず, H_∞ 制御²⁾や予見制御³⁾などを応用した研究も行われており, 建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, 主にフィードバック制御のみによるものであった。一方, She らにより提案された等価入力外乱手法⁴⁾(EID: equivalent input disturbance) は従来のフィードバック制御に EID 推定器をとりつけたものであることから, 従来のフィードバック制御系の制御性能を向上させることが期待されている。

等価入力外乱手法を用いた建物のアクティブ制御に関する既往研究では, 筆者らにより, 検討が行われ, EID 推定器を取り付けることにより, 特に高層建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⁵⁾。

EID 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。筆者らの研究も, 建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。これをうけ, 筆者らは絶対加速度を考慮しこれを抑制する拡張等価入力外乱(EEID: Extended EID)手法を提案した⁶⁾。

一方, 建物により, 制御のしやすさがことなることから, 制御しやすい建物を選択することにより, より効率よく振動を制御できる。建物の設計では, 応答スペクトル手法により建物の固有周期や減衰定数が選択されている。

本手法をアクティブ制御に拡張した方法が佐藤・陳らにより提案され, アクティブ制御に用いる最大制御力を見積もる新しいスペクトルが提案された⁷⁾。本手法は通常のフィードバック制御系を対象としたものであるが, EEID 手法を用いた制御系は外乱に対してフィードフォワード制御も備わった制御系であることから, EEID 手法へ適用するにはさらなる工夫が必要となる。

本報では, EEID 手法を用いた制御系が, 設計用地震波に対する応答や最大制御力を見積もれる新しい応答スペクトルを提案する。

2. 検証用モデルと等価入力外乱

本報ではEEID手法を用いた制御系の応答スペクトルを構築することを目的として, 図1に示した1自由度系のモデルを用いる。

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。

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

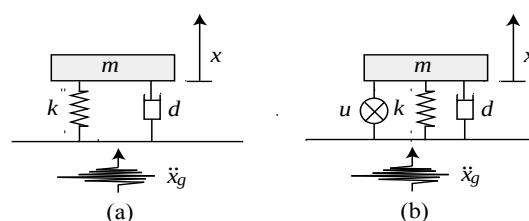


Fig. 1 SDOF model: (a) Without active control and (b) With active control

次に, 式(1)による建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,

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

となる。

式(2)のブロック線図を図 2(a)に示す。次に, 図 2(b)のシステムについて検討をする。即ち, ある信号が制御入力マトリックス B から入力される場合である。このときの状態を $\bar{z}(t)$ とおく。これらのシステムに対して, $\bar{y}(t) = y(t)$ が成り立つとき, $d_e(t)$ をオリジナルの外乱 $d(t)$ の EID と定義する。即ち, EID とは, 実際の外乱と同じ出力をもたらす制御入力チャンネル B から入力する信号のことである。

3. 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

文献 6)より, 絶対加速度を制御する EID 手法を用いた制御系は図 3 により与えられる。図 3 において, L_p はオブザーバゲインであり, B^+ は以下の式で与えられる行列 B の疑似逆行列は以下により与えられる。

A new spectrum for designing extended-equivalent-input approach system

Kou Miyamoto, Daiki Sato, Yinli Cheng and Jinhua She

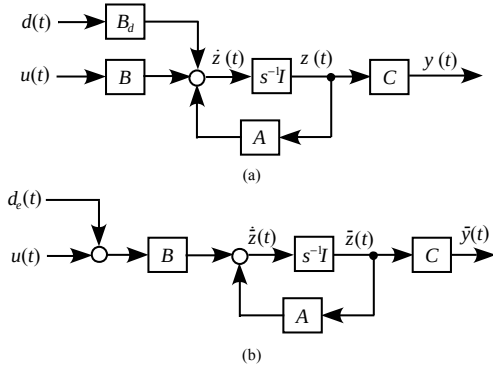


Fig. 2 Concept of EID (a) original plant (b) plant with EID

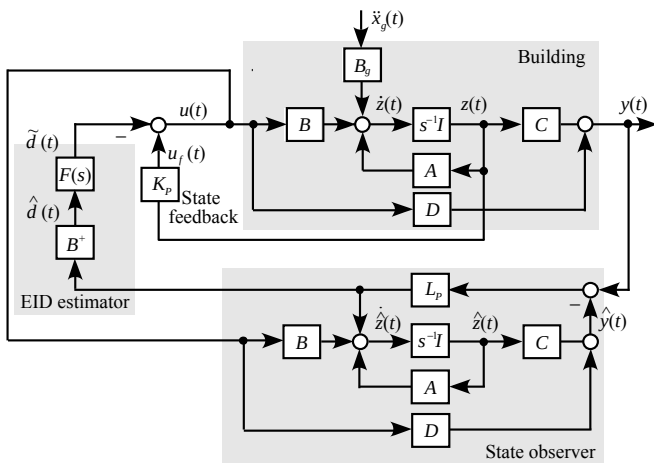


Fig. 3 Configuration of EEID-based active structural control system.

$$B^+ = \frac{B^T}{B^T B} \quad (4)$$

また、 K_p は以下の制御則を持つコントローラゲインである。

$$u_f = K_p \dot{x}(t) \quad (5)$$

さらに、 $F(s)$ はローパスフィルターであり、式(6)により与えられる。

$$F(s) = \frac{N_F}{Ts + 1} \quad (6)$$

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0~1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⁴⁾。

図3に示した制御系について、地震入力から、相対変位・速度から構成されるベクトルである状態 $z(t)$ までの伝達関数のブロック線図は図4により与えられる⁶⁾。ここで、 $C_{FF}(s)$ は以下の式で与えられる。

$$C_{FF}(s) = B_d - BF(s)B^+L_pG_o(s) \quad (7)$$

従って、例えば、出力マトリックス C を $C = [1 \ 0]$ とし、出力を $y(t) = Cz(t)$ とすることで、地震入力から相対変位までの伝達関数を計算することができる。

一方、地震入力から絶対加速度までの伝達関数のブロック線図は図5により与えられる。

なお、図中において

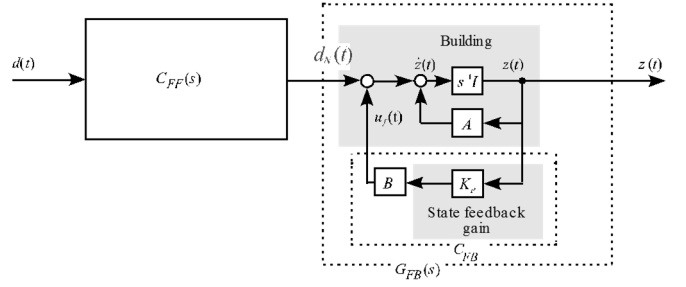


Fig. 4 Block diagram of transfer function from disturbance to state of EEID

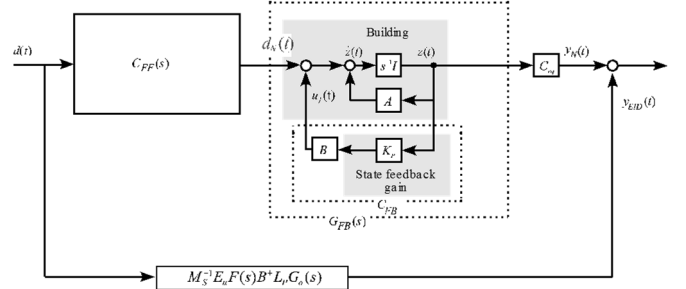


Fig. 5 Block diagram of transfer function from disturbance to absolute acceleration

$$C_{eq} = \begin{bmatrix} -m^{-1}k & -m^{-1}(c + K_p) \end{bmatrix} \quad (8)$$

図5からもわかるように、絶対加速度はフィードバック制御部分のアウトプットの他に、外側ループからの入力があり、制御系の絶対加速度は式(9)により与えられる。

$$\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) = C_{eq}z(t) + y_{EID}(t) \quad (9)$$

図5より、相対変位・速度とは異なり2つの信号($C_{eq}z(t)$ と $y_{EID}(t)/m$)を考慮する必要があることが分かる。

4. EEIDの応答と制御力を推定するスペクトル

本章では、EEID手法を用いた制御系の最大相対変位、相対速度、絶対加速度、また最大制御力を推定するスペクトルを提案する。

最大相対変位・速度は、図4からも明らかのように、本制御系は、外乱がフィードフォワード制御部分によって低減された波である $d_M(t)$ が、フィードバック制御部分に入力することから、 $d_M(t)$ を推定し、これに対する変位・速度応答スペクトルを描くことにより、応答を推定できることがわかる。

一方で、絶対加速度については図5に示したように、相対変位・速度とは異なり、外側からのループがある。一般的に、速度応答スペクトルに固有角周波数を掛け合わせることで、疑似的に加速度応答スペクトルを得ることができる。しかし、本制御系においては、絶対加速度までのブロック線図には、相対変位・速度までのブロック線図にはない外側からのループがあることから、単に速度応答スペクトルに固有角周波数を掛け合わせるのみでは不十分であることがわかる。なお、 $d_M(t)$ に対する加速度応答スペクトル $S_A(h_{eq}, \omega)$ は $y(t) = C_{eq}z(t)$ とした際の $y(t)$ を示す。

$y_{EID}(t)$ の最大値 $|y_{EID}(t)|_{\max}$ は、EIDの定義より、式(10)により与えられる。

$$|y_{EID}(t)|_{\max} = \left| \frac{\tilde{d}_e(t)}{m_s} \right|_{\max} \approx \left| \frac{d_e(t)}{m_s} \right|_{\max} = |\ddot{x}_g(t)|_{\max} \quad (10)$$

従って、EEID 手法を用いた制御系の絶対加速度を推定するスペクトル $S_{A,EID}(h_{eq}, \omega)$ は、 $|y_{EID}(t)|_{\max}$ と $S_{A,EID}(h_{eq}, \omega)$ の単純和と平方二乗和の平均により推定する（式(11)）。

$$S_{A,EID}(h_{eq}, \omega) = \left\{ \frac{ABS_{AC} + RSS_{AC}}{2} \right\} \quad (11)$$

ここで

$$ABS_{AC} = S_{A,N}(h_{eq}, \omega) + |y_{EID}(t)|_{\max} \quad (12)$$

$$RSS_{AC} = \sqrt{S_{A,N}(h_{eq}, \omega)^2 + |y_{EID}(t)|_{\max}^2} \quad (13)$$

次に、制御力の最大値の推定方法を述べる。EEID 手法をもつ制御系の場合、制御入力 $u(t)$ は 2 種類の制御力より構成され、状態フィードバック制御による制御入力 $u_f(t)$ と推定 EID $\tilde{d}_e(t)$ の逆位相を用いて次式により求められる。

$$u(t) = u_f(t) + \tilde{d}_e(t) \quad (14)$$

推定 EID $\tilde{d}_e(t)$ の最大値 $|\tilde{d}_e(t)|_{\max}$ は式(15)により与えられる。

$$|y_{EID}(t)|_{\max} = \left| \frac{\tilde{d}_e(t)}{m_s} \right|_{\max} \approx \left| \frac{d_e(t)}{m_s} \right|_{\max} = |d(t)|_{\max} \quad (15)$$

次にフィードバック制御入力最大値について述べる。

式(1)で示される制御系がフィードバック制御入力のみをもつ場合、 $u(t) = u_f(t)$ となり、式(1)と式(5)から以下の式を得る。

$$m\ddot{x}(t) + (c + K_P)\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (16)$$

従って、式(5)によるフィードバック制御を持つ場合、建物の見かけの減衰係数（等価減衰係数）が $c + K_P$ になることを表している。なお、このときの減衰定数（等価減衰定数）を h_{eq} とすると、この制御系に対する速度応答スペクトルは $S_V(h_{eq}, \omega)$ によって与えられる。従って、フィードバック制御の最大制御力 $|u_f(t)|_{\max}$ を評価する制御力スペクトル $U(h_{eq}, \omega)$ は速度応答スペクトル $S_V(h_{eq}, \omega)$ を用いて

$$U(h_{eq}, \omega) = K_{P,2} S_V(h_{eq}, \omega) \quad (17)$$

により与えられる⁷⁾。絶対加速度と同様に、EEID 手法を用いた制御系の制御力の最大値を推定するスペクトル $U_{EID}(h_{eq}, \omega)$ は絶対加速度の推定と同様に、 $|\tilde{d}_e(t)|_{\max}$ と $U(h_{eq}, \omega)$ の単純和と平方二乗和の平均を用いて以下の式(18)により与えられる。

$$U_{EID}(h_{eq}, \omega) = \left\{ \frac{ABS_U + RSS_U}{2} \right\} \quad (18)$$

ここで

$$ABS_U = U(h_{eq}, \omega) + |\tilde{d}_e(t)|_{\max} \quad (19)$$

$$RSS_U = \sqrt{U(h_{eq}, \omega)^2 + |\tilde{d}_e(t)|_{\max}^2} \quad (20)$$

式(18)の両辺を建物の重量で除することにより、制御力せん断力係数スペクトル $S_{C,EID}(h_{eq}, \omega)$ が式(21)により与えられる。

$$S_{C,EID}(h_{eq}, \omega) = \frac{U_{EID}(h_{eq}, \omega)}{mg} \quad (21)$$

5. 数値例

5.1 Art Hachinohe 波に対する検討

本報では建物の設計に最も用いられる地震波の 1 つである El Centro 波を用いて本手法の有効性を示す。地震波の加速度波形と擬似速度応答スペクトルを図 6 に示す。

なお、他の地震波での検討として Art Kobe 波に対する検討も行ったが、地震波と解析結果は付録に示す。

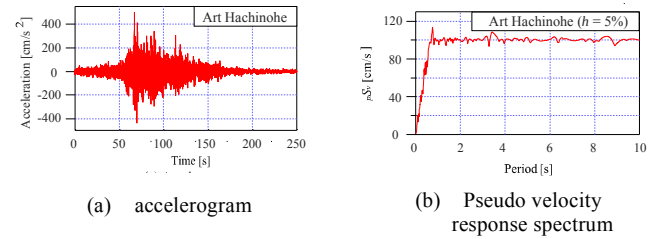


Fig. 6 Art Hachinohe wave

上記の地震波に対して、制御対象となる建物の固有周期を 0.5 s から 0.5 s ずつ 10 s まで変化させ、その際の最大相対変位・速度、絶対加速度と最大制御力を図 7 中に黒点でプロットし、スペクトル値を比較する。なお、建物モデルの減衰定数は 0.02 とする。フィードバック制御については、本研究では h_{eq} が 0.3 と 0.5 になるようなフィードバックコントローラをそれぞれ設計した⁸⁾。以下、図 7、8 はそれぞれ $h_{eq}=0.3$ と 0.5 になる制御系の応答スペクトルを示す。

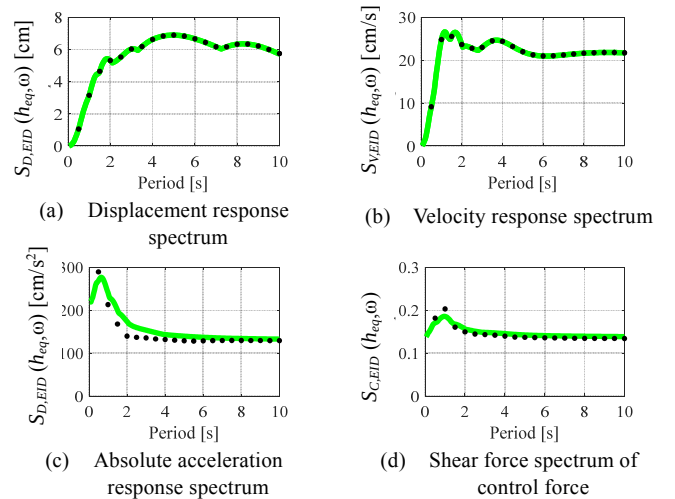


Fig. 7 Response spectra ($h_{eq} = 0.3$)

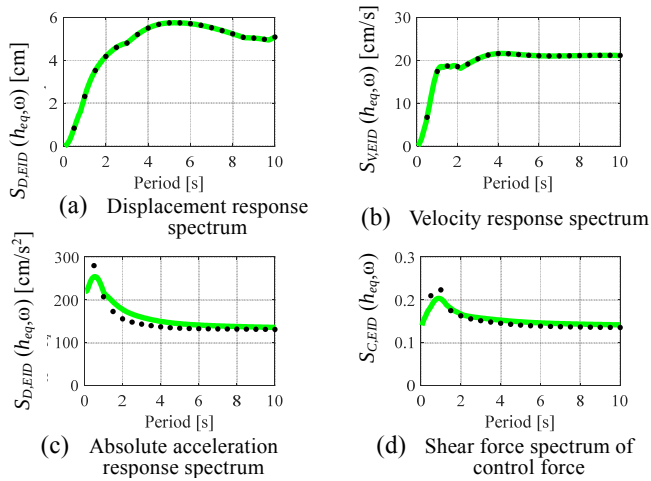


Fig. 8 Response spectra ($h_{eq} = 0.5$)

図 7, 8 の結果より, いずれの等価減衰定数においても, 相対変位と速度の最大値は, 本報提案のスペクトル値と完全に一致することが分かり, フィードフォワード制御部分によって低減された外乱に対する応答スペクトルによって, これらの応答予想することができることが明らかになった。また, 最大制御力を見積もる制御力に関するせん断力スペクトルと, 最大絶対加速度についても, 式(11)と式(18)に示したスペクトルにより, 特に, アクティブ制御が取り付けられることが期待される長周期領域を精度よく見積もることが出来ることが明らかになった。

5.2 Art Kobe に対する検討

下記に示すArt Kobe波にする, $h_{eq}=0.5$ となるフィードバックコントローラをもつケースでの応答スペクトルを下記に示す。

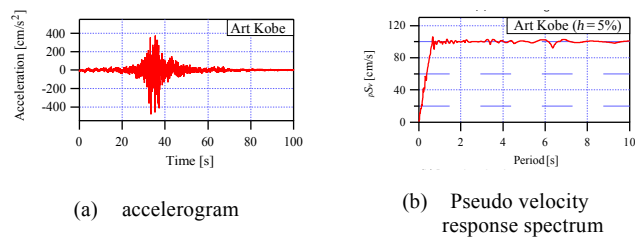


Fig. 9 Art Kobe wave

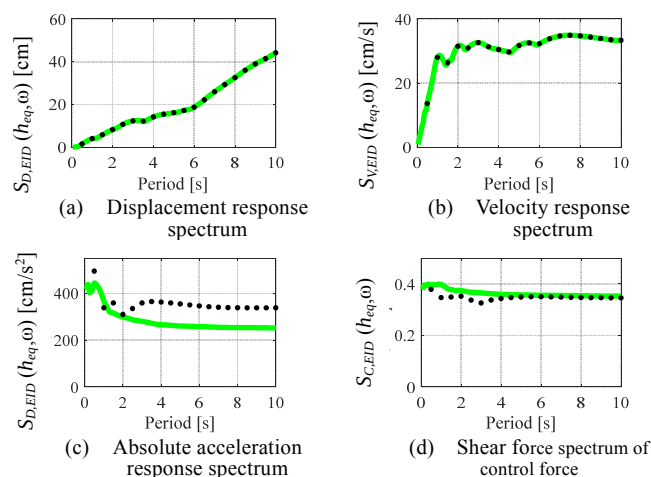


Fig. 10 Response spectra ($h_{eq} = 0.3$)

図10より, 加速度応答スペクトルにおいて, 固有周期4秒以降の建物に対しては推定精度が高くないことが分かる。地震波によっては, 図のように推定精度が十分でないことがあることが, 本報の課題として残された。

6. おわりに

本報は従来の, 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)を拡張子, 絶対加速度と相対変位を抑える拡張等価入力外乱手法(EEID: Extend EID)の最大相対変位・速度, 絶対加速度と最大制御力を見積もるための新しいスペクトルを提案した。本報で得られた知見は以下の通りである。

- EEID 手法を用いた制御系は外乱に対してフィードフォワード制御を従来のフィードバック制御に組み合わせた制御系であり, フィードフォワード制御部分によって低減された外乱に対する応答スペクトルを描くことにより, 最大相対変位と速度を評価できる応答スペクトルを描くことができる。
- しかし, 絶対加速度に対しては, 地震入力から相対変位・速度の制御系とは異なり, さらに EID による絶対加速度が生じることから, フィードバック制御による加速度と, EID を用いたことによって発生した加速度の2種類の波を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) Guclu R. Sliding mode and PID control of a structural system against earthquake. Math Comput Model 2006; 44 (1-2): 210-7.
- 2) Mechbal N, Nóbrega EGO. Spatial H_∞ approach to damage-tolerant active control. Struct Control Health Monit 2015; 22 (8): 1148-72.
- 3) Mei G, Kareem A, Kantor JC. Model predictive control of structures under earthquakes using acceleration feedback. J Eng Mech 2002; 128 (5): 574-85.
- 4) 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.
- 5) Kautsky, J., N.K. Nichols, and P. Van Dooren, Robust Pole Assignment in Linear State Feedback, International Journal of Control, 41 ;1985;1129-1155.
- 6) 宮本皓, 佐藤大樹, 余錦華: 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, 日本建築学会構造系論文集, 3月, 2019年 (採用決定)
- 7) 陳引力, 佐藤大樹, 宮本皓, 余錦華: 地震外乱を対象とした免震建物のアクティブ制御設計法の提案 (その1: 必要制御力スペクトルと重み関数決定方法の提案), 日本建築学会大会, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 日本建築学会, vol. B-2, pp. 929-930, 9月, 2018年
- 8) 陳引力, 佐藤大樹, 宮本皓, 余錦華: 1質点系モデルを対象としたアクティブ制御の等価モデルの構築 (その1: LQR重み関数の構造特性・振動特性への影響), 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 381-384, 3月2017年

-
- *1 東京工業大学 大学院生 博士課程・修士 (工学)
 - *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)