

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	Prediction control force spectrum for feedback control
著者(和文)	陳引力, 佐藤大樹, 宮本 皓, 余錦華
Authors(English)	Yinli Chen, Daiki Sato, Kou Miyamoto, Jinhua SHE
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 341-344
Citation(English)	, , , pp. 341-344
発行日 / Pub. date	2019, 3

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

構造—振動

正会員 ○ 陳 引力^{*1}
〃 宮本 皓^{*3}

正会員 佐藤大樹^{*2}
〃 余 錦華^{*4}

アクティブ制御 制御力 スペクトル
等価モデル

1. はじめに

大地震時に、上部構造の損傷を最小限にすることや、地震後も事業を継続することを実現することを目的として、日本では免震構造の適用件数が兵庫県南部地震以降から急激に増えている¹⁾。現在では、世界中に公共施設や高層マンションのみならず、重要建築物にも応用され、免震構造の適用先は多岐に渡る²⁾。また、世界中に原子力施設において発電用建屋への免震構造の適用を目指した研究・開発が行われているものの、2017年の段階において、日本では原子力発電用建屋に免震構造が適用された事例は存在しない³⁾⁵⁾。その原因の一つとしては、免震構造は上部構造の絶対加速度応答を低減するが、免震層の長周期化により、パッシブ免震だけで相対変位応答を許容範囲内に抑えることが難しいと考えられる⁶⁾。この問題を解決する方法として、パッシブ免震にアクティブ制御併用する方法が挙げられる⁷⁾。

建築物にアクティブ制御を応用する際、必要となる制御力が大きくなることが予想されるため、最大制御力を予想できる理論式が必要となる。筆者らは、LQRを用いて制御系を設計する際の最大制御力を推定できる制御力スペクトルを提案した⁸⁾。しかし、筆者らが提案された制御力スペクトルはLQRのみに適用できる。また、制御系の固有周期を操作できない点から、応用先が限定されている。

本報では、LQRだけでなくフィードバック制御全体において固有周期と減衰率を同時に操作するときの最大制御力を予測する制御力予測スペクトルを提案する。ここでは、擬似最大制御力を導出するために、1質点モデルを用いた。また、制御力予測スペクトルを用いて、制御系の固有周期による最大制御力への影響について考察する。最後に、数値シミュレーションにより、制御力予測スペクトルの制度検証を行う。

2. 制御対象モデルの概要

本報では制御力スペクトルを構築するために、1質点線形モデルを用いる。モデルの剛性要素 k と減衰係数 c は線形のパネとダッシュポットによってモデル化され、それぞれ式(2)と式(3)によって与えられる。

$$k = \frac{4\pi^2 \cdot m}{T^2} \tag{1}$$

$$c = 2\zeta\sqrt{m \cdot k} \tag{2}$$

ここに、 m : モデルの質量、 T : 固有周期、 ζ : 減衰率である。

上述の1質点系モデルにアクティブ制御装置を設置する。以降、アクティブモデルと呼ぶ。

3. 制御系の設計と等価モデルの構築

制御系の運動方程式を式(3)に示す。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = d(t) - u(t) \tag{3}$$

ここに、 $x(t)$: モデルの応答変位、 $d(t)$: 外乱入力、 $u(t)$: 制御入力である。

アクティブ制御システムの設計は、フィードバック制御に基づく制御系を構築するために、アクティブモデルの運動方程式を以下の状態方程式にする。

$$\dot{z}(t) = Az(t) + B_d d(t) - B_u u(t) \tag{4}$$

ここに、 $Z(t)$: 状態ベクトル、 A : システムマトリックス、 B_u : 制御入力ゲイン、 B_d : 外乱入力ゲイン。 z 、 A 、 B_u 、 B_d は式(5)による。

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$B_d = B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ m \end{bmatrix} \tag{6}$$

本報では、フィードバック制御を行い、以下の制御則を持つ。

$$u(t) = K_p z(t) = \begin{bmatrix} K_{p1} & K_{p2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} = K_{p1}x(t) + K_{p2}\dot{x}(t) \tag{7}$$

Fig. 1 に制御系のブロック線図を示す。

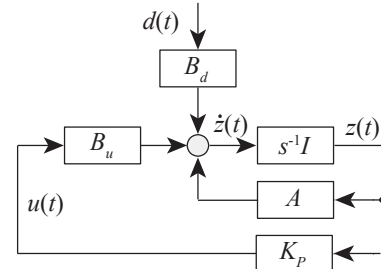
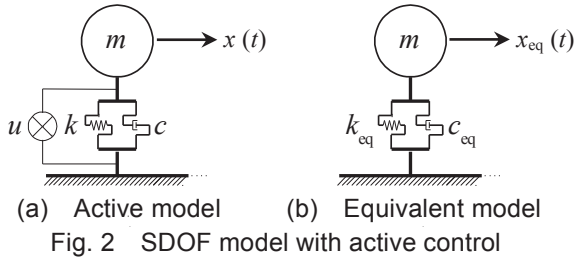


Fig. 1 Block diagram of control system

4. 等価モデルの構築

本章では、アクティブモデルの変位 $x(t)$ と等しい変位 $x_{eq}(t)$ となる等価モデルを構築することで、アクティブモデルの動特性を陽な形で表す (Fig. 2, $x_{eq}(t) = x(t)$)。



制御力 (式(7)) を制御系の運動方程式 (式(3)) に代入すると、次式になる。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = d(t) - K_{P1}x(t) + K_{P2}\dot{x}(t) \quad (8)$$

上式を整理すると、

$$m\ddot{x}(t) + c_{eq}\dot{x}(t) + k_{eq}x(t) = d(t) \quad (9)$$

が得られる。ここに、 k_{eq} と c_{eq} はそれぞれ等価モデルの剛性係数と減衰係数で、次式より与えられる。

$$k_{eq} = k + K_{P1}, \quad c_{eq} = c + K_{P2} \quad (10a, b)$$

また、等価モデルの動特性を表す固有角周波数、固有周期と減衰率は次式より計算される。

$$\omega_{eq} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m}}, \quad T_{eq} = \frac{2\pi}{\omega_{eq}}, \quad \zeta_{eq} = \frac{c_{eq}}{2m\omega_{eq}} \quad (11a, b, c)$$

式(11)より、目標等価固有周期 $T_{eq,tar}$ と目標等価減衰率 $\zeta_{eq,tar}$ となるための、目標等価剛性係数 $k_{eq,tar}$ と目標等価減衰係数 $c_{eq,tar}$ はそれぞれ次式によって計算される。

$$k_{eq,tar} = \omega_{eq,tar}^2 m = \frac{4\pi^2 m}{T_{eq,tar}^2} \quad (12a)$$

$$c_{eq,tar} = 2\zeta_{eq,tar} \omega_{eq,tar} m \quad (12b)$$

式(12)を式(10)に代入すると、目標の動特性を満たすための状態フィードバックゲイン K_P の計算式が得られる。

$$K_{P1} = k_{eq,tar} - k \quad (13a)$$

$$K_{P2} = c_{eq,tar} - c \quad (13b)$$

5. 制御力予測スペクトル

本章では、アクティブモデルの最大制御力の評価式を導出し、最大制御力を見積もれる制御力予測スペクトルを提案する。

式(13)を式(7)に代入すると、制御力 $u(t)$ は

$$u(t) = (k_{eq,tar} - k) \cdot x(t) + (c_{eq,tar} - c) \cdot \dot{x}(t) \quad (14)$$

となる。また、式(14)の最大値を次式に示す。

$$\begin{aligned} u_{max} &= \text{Max.} \{ (k_{eq,tar} - k) \cdot x(t) + (c_{eq,tar} - c) \cdot \dot{x}(t) \} \\ &\leq \text{Max.} \{ (k_{eq,tar} - k) \cdot x(t) \} + \text{Max.} \{ (c_{eq,tar} - c) \cdot \dot{x}(t) \} \\ &= (k_{eq,tar} - k) \cdot S_D(T_{eq,tar}, \zeta_{eq,tar}) + (c_{eq,tar} - c) \cdot S_V(T_{eq,tar}, \zeta_{eq,tar}) \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、 $S_D(T_{eq,tar}, \zeta_{eq,tar})$ と $S_V(T_{eq,tar}, \zeta_{eq,tar})$ はそれぞれ固有周期 $T_{eq,tar}$ 、減衰率 $\zeta_{eq,tar}$ における変位応答スペクトルと速

度応答スペクトルの値である。また、式(15)をモデルの重量 mg で割ると、最大制御力の層せん断力係数 $C_{u,max}$ が得られる。

$$\begin{aligned} C_{u,max} &\leq \frac{k_{eq,tar} - k}{mg} S_D(T_{eq,tar}, \zeta_{eq,tar}) + \frac{c_{eq,tar} - c}{mg} S_V(T_{eq,tar}, \zeta_{eq,tar}) \\ &= C_{u,disp.} + C_{u,vel.} \end{aligned} \quad (16a)$$

ここで、

$$C_{u,disp.} = \frac{\omega_{eq,tar}^2 - \omega^2}{g} S_D(T_{eq,tar}, \zeta_{eq,tar}) \quad (17b)$$

$$C_{u,vel.} = \frac{2\zeta_{eq,tar} \omega_{eq,tar} - 2\zeta\omega}{g} S_V(T_{eq,tar}, \zeta_{eq,tar}) \quad (17c)$$

式(16)より、最大制御力の層せん断力係数 $C_{u,max}$ は変位 S_D の項と速度 S_V の項で構成されることがわかる。しかし、変位と速度の位相差により両項の最大値が同時に発生しないため、最大制御力の層せん断力係数を変位項と速度項の平方和の平方根を用いて近似する。なお、変位項と速度項の最大値を用いる検討を附録に示す。

$${}_{\rho} S_c(T, T_{eq,tar}, \zeta, \zeta_{eq,tar}) \equiv \sqrt{C_{u,disp.}^2 + C_{u,vel.}^2} \approx C_{u,max} \quad (18)$$

式(18)は最大制御力の層せん断力を予測できる最大制御力の層せん断力予測スペクトルであり、以下に制御力予測スペクトルと呼ぶ。式(18)より、数値シミュレーションを必要なく、最大制御力は等価モデルの変位応答スペクトルと速度応答スペクトルを用いて予測できる。

6. 数値検証

本章では数値シミュレーションを行い、提案された制御力予測スペクトルの精度検証を行う。

6.1 モデルと地震波の概要

数値シミュレーションに用いるモデルの固有周期 T と減衰率 $\zeta (= c / (2\omega m))$ をそれぞれ 4 s と 0.01 とし、質量 m を 1 kg とする。なお、モデルの剛性係数 k と減衰係数 c は式(1)と式(2)より計算され、Table 1 に示す。また、等価モデルの減衰率 ζ_{eq} をそれぞれ 0.1, 0.3, 0.5 と 0.7 にする。

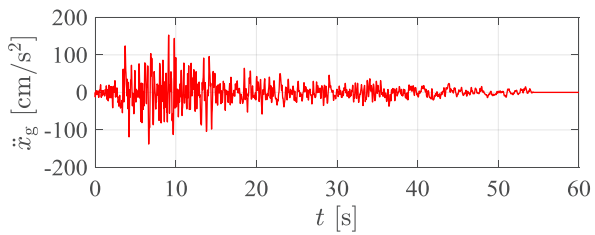
Table 1 Parameters of model

Parameters	Value
m [kg]	1.00
k [N/m]	2.46
c [Ns/m]	0.03

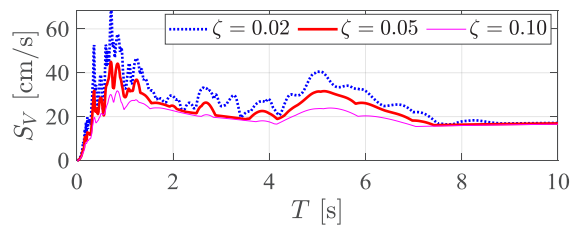
検証用地震波を Taft NS (Fig. 3), El Centro NS (Fig. 4) と JMA Kobe NS (Fig. 5) とする。なお、外乱入力

$$d(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (19)$$

である。

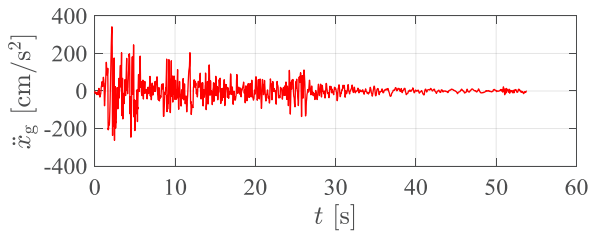


(a) accelerogram

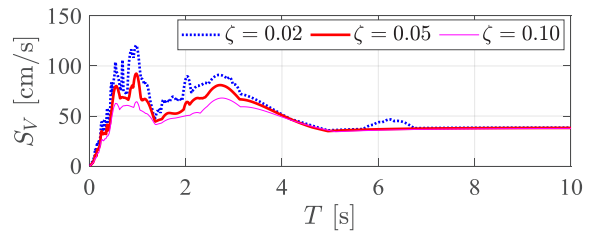


(b) velocity response spectrum

Fig. 3 Taft NS wave

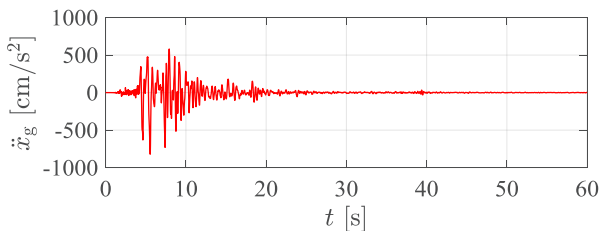


(a) accelerogram

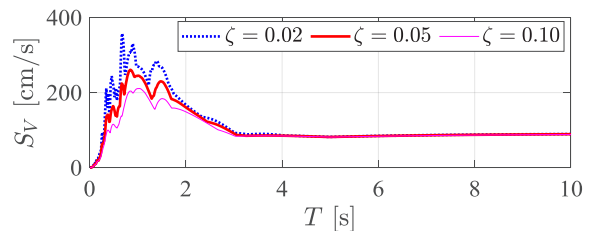


(b) velocity response spectrum

Fig. 4 El Centro NS wave

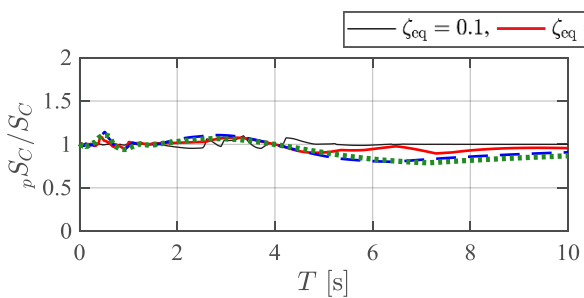


(a) accelerogram

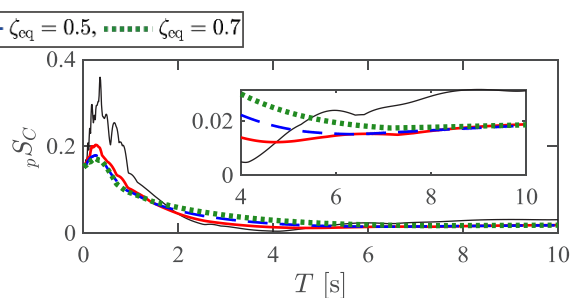


(b) velocity response spectrum

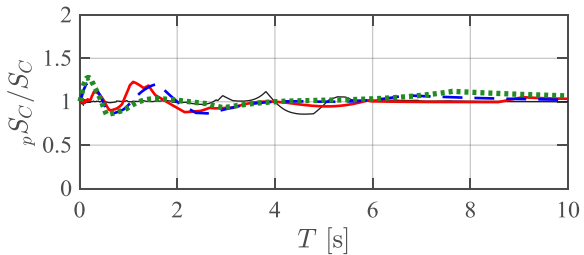
Fig. 5 JMA Kobe NS wave



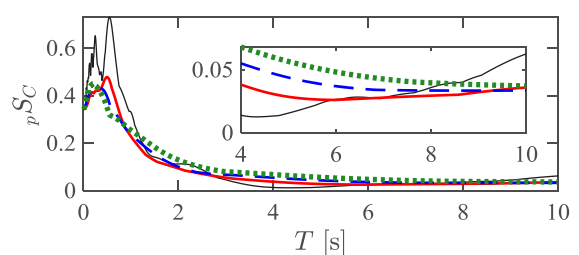
(a) Taft NS



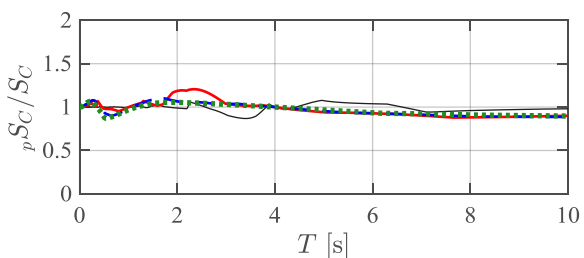
(a) Taft NS



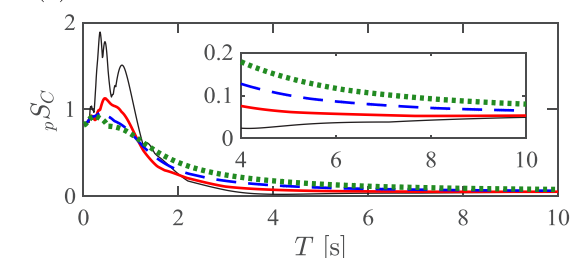
(b) El Centro NS



(b) El Centro NS



(c) JMA Kobe NS



(c) JMA Kobe NS

Fig. 6 Accuracy of prediction control-force spectrum

Fig. 7 Pseudo control-force spectrum ($\zeta = 0.01$)

6.2 数値シミュレーション

Fig. 6 に式(18)により計算された制御力予測スペクトル ${}_pS_C$ の精度を示す。なお、制御力スペクトル S_C (真値) は数値シミュレーションの結果を用いる。Fig. 6 より、提案された制御力予測スペクトルの誤差はほぼ 20%以内に抑えられ、精度よく最大制御力を予測している。

Fig. 7 (a) ~ (c)にそれぞれ式(18)より計算された Taft NS, El Centro NS と JMA Kobe NS の制御力予測スペクトル ${}_pS_C$ を示す。Fig. 7 より、以下のことがわかる。

- (1) 地震波の最大加速度が大きくなると、目標の動特性を満たすための最大制御力が大きくなる。
- (2) 等価固有周期がモデルの初期固有周期と一致する時、等価減衰率を大きくすると最大制御力が大きくなる。
- (3) 共振する時、等価減衰率を大きくすると最大制御力が小さくなる。
- (4) 共振域を超えると、等価減衰率 0.1 のケースを除外し、等価固有周期を長くすると最大制御力は小さくなる傾向がある。
- (5) El Centro と Taft における、等価固有周期が長い場合、等価減衰率の小さい制御系の制御力が比較的に大きい。

7. まとめ

本報では、1 質点系フィードバック制御における、目標となる固有周期と減衰率を満たすための擬似制御力を提案した。また、制御力予測スペクトルを用いて、制御系の固有周期による最大制御力への影響について考察した。最後に、数値シミュレーションにより、制御力予測スペクトルの精度検証を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 提案された擬似制御力の誤差がほぼ 20%以内に抑えられ、精度よく最大制御力を予測することができる。
- (2) 地震波の最大加速度が大きくなると、目標の動特性を満たすための最大制御力が大きくなる。
- (3) 共振域を超えると、等価固有周期を長くすると最大制御力は小さくなる傾向がある。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会：免震建築物計画推移棟数，<http://www.jssi.or.jp/menshin/doc/ms_ss_data.pdf>，2016
- 2) 田中佑治，福和伸夫，飛田潤，護雅史：国内免震建物のデータベース構築と現状分析，日本建築学会技術報告集，Vol. 17，No. 35，p. 79-84，2011.2
- 3) 島本龍，同梅木芳人，同中川進一郎：高震度地域における免震型原子炉建屋の地震時挙動に関する検討(その1)全体概要，日本建築学会大会学術講演梗概，B-2，pp. 1285-1286，2013.8
- 4) 平木隆文，金澤健司，北村春幸：免震構造システムを対象とした積層ゴム大変形時の力学エネルギー評価手法の構築，日本建築学会構造系論文集，Vol. 82，No. 731，p. 75-85，2017.1
- 5) Kumar A. S., Whittaker: Effect of seismic hazard definition on isolation-system displacements in nuclear powerplants, Engineering Structures, Vol. 148, pp. 424-435, 2017.10

- 6) M. Kumar, A. S. Whittaker: Effect of seismic hazard definition on isolation-system displacements in nuclear powerplants, Engineering Structures, Vol.148, pp. 424-435, 2017.6
- 7) 陳引力，宮本皓，佐藤大樹，余錦華：アクティブ制御を併用した超高層免震建築物の風方向風力に対する制御系の設計方法，構造工学論文集，Vol. 64B，pp. 199-206，2018.3
- 8) Yinli Chen, Daiki Sato, Kou Miyamoto, Jinhua She: Performance-Oriented Design Method for Base-Isolation Structure Combined with Active Control, Proceedings of 5th Joint Workshop on Building / Civil Engineering between Tongji & Tokyo Tech, 2018.8.

附録 A 変位項と速度項の最大値を用いる最大制御力の検討

本章では、変位項と速度項の最大値を用いる場合の制御力予測スペクトルの精度検証を行う。本章で用いる制御力予測スペクトル ${}_pS_C$ は次式より計算される。

$${}_pS_C(T, T_{eq,tar}, \zeta, \zeta_{eq,tar}) \equiv C_{u,disp} + C_{u,vel} \quad (A1)$$

Fig. A1 に式(A1)により計算された制御力予測スペクトル ${}_pS_C$ の精度を示す。なお、制御力スペクトル S_C (真値) は数値シミュレーションの結果を用いる。

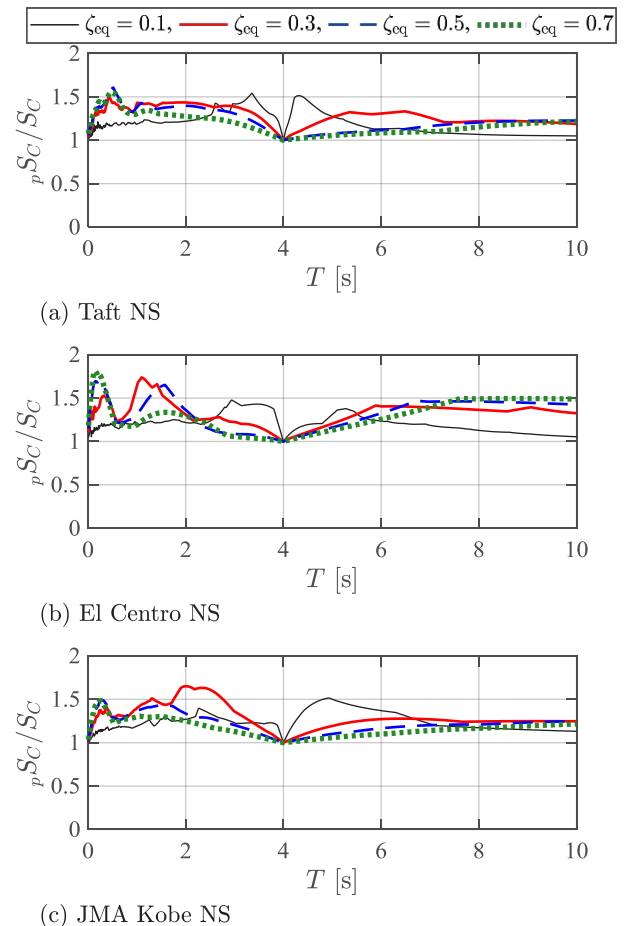


Fig. A1 Accuracy of prediction control-force spectrum

Fig. A1 より、式(A1)より計算された制御力予測スペクトルは制御力を 1.5 倍以上と過大に評価する恐れがある。

*1 東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生

*2 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・工博

*3 東京工科大学コンピュータサイエンス学部 教授・工博

Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., School of Bionics, Tokyo University of Technology, Dr. Eng.