

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風方向風力を受けるアクティブ制御を併用した超高層免震建物に対する最大変位と最大制御力の予測
Title(English)	Gust factor approach for Passive base-isolated structure with active structural 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. 229-232
Citation(English)	, , , pp. 229-232
発行日 / Pub. date	2020, 3

風方向風力を受けるアクティブ制御を併用した超高層免震建物に対する 最大変位と最大制御力の予測

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 免震構造 風方向風力
ガストファクタ 制御力

1. はじめに

兵庫県南部地震の後から、建築物が崩壊することを防ぐのみならず、建築物の損傷をできるだけ少なくすることを目的として、免震構造を採用する建築物の件数が急激に増えている¹⁾。現在では多くの建築物が免震構造を採用しており、近年では、超高層建築物への適用も視野にあり、アクティブ制御を併用した免震建築物により、地震時に更なる制御性能を引き出す研究も報告されている^{2)~4)}。

実際の耐風設計において、平均変位を静的なつり合いで算出し、ガストファクタをかけることよって、最大応答を数値シミュレーションせずに予測することができる⁵⁾。しかし、ガストファクタ手法を免震とアクティブ制御を併用した建物に拡張するためには以下の問題を解決する必要がある。

- (1) アクティブ制御を併用した建築物において、平均変位の算出は平均風力のみならず、平均制御力を理論的に予測する必要もある。
- (2) 免震建築物を対象とした変位に対してのガストファクタはすでに検討されたが⁶⁾、アクティブ制御との併用は未だに考慮されていない。
- (3) 最大制御力を予測するための制御力に対するガストファクタはまだ整備されていない。

本研究は数値シミュレーションせずに制御系の平均制御力と平均変位を予測する方法を導出する。また、平均制御力と平均変位の予測値を用いて最大制御力と最大変位を理論的に予測するガストファクタ手法を提案する。さらに、数値例を用いて提案された手法の妥当性を検証する。

2. 建築物モデルと風力の概要

本報における建築物モデルの概要を Fig. 1 に示す。本報では、解析対象のモデルを高さ $H=200\text{ m}$ の超高層免震建築物とし、これの上部構造を 10 質点剪断モデルでモデル化した。各層の剛性 k_i は文献⁷⁾より与えられる。上記の 10 質点の上部構造モデルの下に天然系積層ゴムと線形のオイルダンパーで構成される免震層を設置し、11 質点のモデルとして免震モデルの解析を行う。建築物モデルの諸元を Table 1 に示す。

本報では、モデルに作用する風力を風向角 0° 、再現期間 500 年の 15 ケースの風方向風力とし、風洞実験結果⁸⁾を用いる。応答は 15 ケースのアンサンブル平均より計算される。Fig. 3 に 7 層風力のパワースペクトル密度のアンサンブル平均を示し、Fig. 3 に各層の風力のアンサンブル平均を示す。

3. 制御系の構築

制御系の運動方程式を次式に示す。

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = E_F F(t) - E_u u(t) \quad (1)$$

ここに、 X : 応答変位ベクトル、 M : 質量マトリックス、 K : 剛性マトリックス、 C : 減衰マトリックス、 d : 外乱入力、 u : 制御入力である。 E_d と E_u はそれぞれ d と u の位置を表す入力マトリックスであり、次式で示す。

$$E_F = I, \quad E_u = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2a, b)$$

式(1)の状態方程式を次式に示す。

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + B_F F(t) - B_u u(t) \quad (3)$$

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 : 外乱入力ゲインである。 Z , A , B_u , B_d は式(5)による。

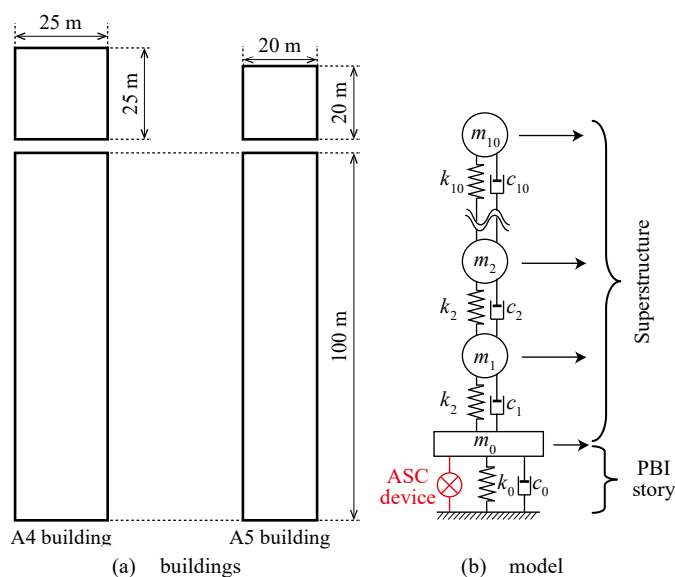


Fig. 1 Buildings and model

$$Z = \begin{bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (4a, b)$$

$$B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E_u \end{bmatrix}, \quad B_F = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E_F \end{bmatrix} \quad (4c, d)$$

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。

$$u(t) = K_P Z(t) = [K_{PD} \quad K_{PV}] \begin{bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{bmatrix} = K_{PD}X(t) + K_{PV}\dot{X}(t) \quad (5)$$

ここに、 K_P : フィードバックゲインであり、 K_{PD} と K_{PV} は次式で定義される。

$$K_{PD} = [K_{P1} \quad \dots \quad K_{P11}], \quad K_{PV} = [K_{P12} \quad \dots \quad K_{P2}] \quad (6a, b)$$

ここに、 K_{Pi} は K_P の i 番目要素を表す。

Fig. 4 に制御系のブロック線図を示す。

本報ではLQR方法を用いて、次式の評価関数 J を最小にする。

$$J = \int_0^{\infty} [Z^T(t)QZ(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (7)$$

ここで、 Q と R はそれぞれ状態と制御力に対する重みである。本報では Q と R を次式のように設定する。

$$Q = 10^\alpha \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = 1 \quad (8a, b)$$

ここに、 α は重み指数である。式(7)より、フィードバックゲインは次式で計算される。

$$K_P = B_u^T P \quad (9)$$

ここで、 P は次式表されるリカッチ代数方程式の解である⁹⁾。

$$A^T P + PA + PB_u R B_u^T P + Q = 0 \quad (10)$$

4. 平均制御力と平均変位の計算

本章では、数値シミュレーションを行わず、風方向風力での制御系の平均制御力の予測式を導出し、数値例で予測式の精度検証を行う。

4.1 平均制御力と平均変位の予測式

式(5)より、制御系の平均制御力は次式となる。

$$\bar{u}(t) = K_{PD}\bar{X}(t) + K_{PV}\dot{\bar{X}}(t) \quad (11)$$

また、文献¹⁰⁾より、制御系の応答速度に平均成分を含まないことより、式(11)の速度項を無視して近似することができる。

$$\bar{u} \approx K_{PD}\bar{X} \quad (12)$$

平均変位は

$$\bar{X} = K^{-1} \begin{bmatrix} \bar{F}_1 \\ \vdots \\ \bar{F}_{10} \end{bmatrix} \quad (13a, b)$$

で計算され、それを式(12)に代入すると

$$\bar{u} \approx K_{PD}K^{-1} \begin{bmatrix} \bar{F}_1 \\ \vdots \\ \bar{F}_{10} \end{bmatrix} \quad (14)$$

となる。式(14)の左辺と右辺の両方に平均制御力 \bar{u} があるため、式(14)を解くと数値シミュレーションをせずに平均制御力の予測値が得られる。しかし、式(14)に剛性マトリックスのインバースを用いられるため、多自由度の場合数値解しか得られない。

式(14)で計算された平均制御力の予測値を式(13)に代入すると、平均変位の予測値が得られる。

4.2 数値検証

Fig. 5 に平均制御力の予測値とシミュレーション結果との比較を示す。Fig. 5 より、以下の結果がわかる。

- (1) 平均制御力の予測値はシミュレーション結果に精度よく一致するため、式(14)の妥当性を確認した。

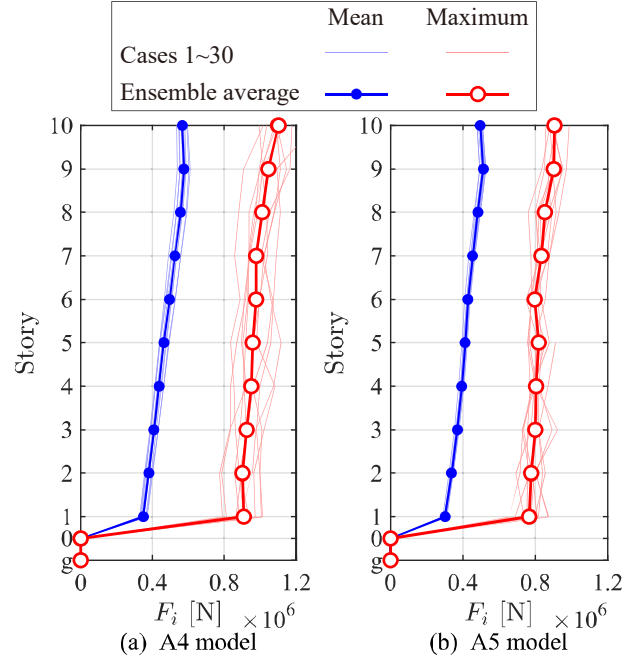


Fig. 2 Story wind force

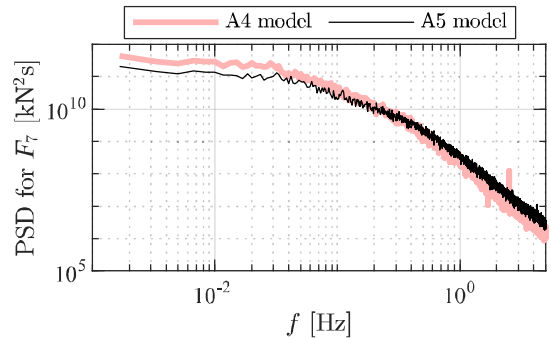


Fig. 3 Ensemble average of wind force (7th story)

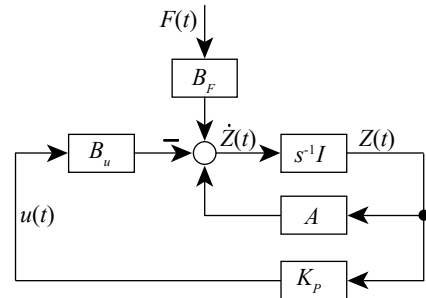


Fig. 4 Block diagram of control system

- (2) α を大きくすると、平均制御力は大きくなる傾向がある。

Fig. 6 に平均変位の予測値とシミュレーション結果との比較を示す。Fig. 6 より、以下の結果がわかる。

- (1) 平均変位の予測値はシミュレーション結果に精度よく一致するため、式(14)の妥当性を確認した。
 (2) α を大きくすると、平均変位は小さくなる傾向がある。
 (3) 免震とアクティブ制御の併用により、免震層変位をマイナス方向まで抑えることができる。

5. ガストファクターの計算

本章では、耐風設計で広く用いられるガストファクター方法を拡張し、アクティブ制御の併用を考慮しての最大変位と最大制御力を予測するガストファクターを提案する。

5.1 変位に対するガストファクター

Fig. 7 に変位に対するガストファクター G_D の設計値とシミュレーション結果との比較を示す。なお、ガストファクターの設計値は文献²⁾で示された計算式を用いる。

Fig. 7 より、以下の結果が得られる。

- (1) 変位に対するガストファクターの設計値はシミュレーション結果と概ね一致するため、文献⁰⁾の計算式はアクティブ制御を併用した免震建築物へ拡張することができる。
 (2) α を大きくすると変位に対するガストファクターは小さくなる傾向がある。
 (3) α が比較的小さい場合、免震周期を長くすると変位に対するガストファクターは大きくなる傾向がある。
 (4) α が比較的大きい場合、免震周期を長くしても変位に対するガストファクターは変化しない。

5.2 制御力に対するガストファクター

5.2.1 制御力に対するガストファクターの導出

制御力に対するガストファクターは次式で定義される。

$$\begin{aligned} G_u &= \frac{\max\{u\}}{\bar{u}} \approx \frac{K_{PD} \max\{X\} + K_{PV} \max\{\dot{X}\}}{K_{PD}\bar{X}} \\ &= \frac{K_{PD} \max\{X\}}{K_{PD}\bar{X}} + \frac{K_{PV} \max\{\dot{X}\}}{K_{PD}\bar{X}} \\ &\approx G_D + \frac{K_{PV} \max\{\dot{X}\}}{K_{PD}\bar{X}} \end{aligned} \quad (15)$$

また、最大速度はモーダル理論とガストファクターを用いて、次式で予測することができる。

$$\max\{\dot{X}\} \approx (\max\{X\} - \bar{X})\omega_1 \approx (G_D\bar{X} - \bar{X})\omega_1 \quad (16)$$

ここに、 ω_1 は制御系の1次固有角周波数である。

式(16)を式(15)に代入すると

$$G_u \approx G_D + \frac{K_{PV}[(G_D\bar{X} - \bar{X})\omega_1]}{K_{PD}\bar{X}} \quad (17)$$

となる。

5.2.2 数値検証

Fig. 8 に制御力に対するガストファクター G_u の予測値とシミュレーション結果との比較を示す。

Fig. 8 より、以下の結果が得られる。

- (1) 制御力に対するガストファクターの設計値はシミュレーション結果と概ね一致するため、式(17)の妥当性を確認した。
 (2) α を大きくすると制御力に対するガストファクターは小さくなる傾向がある。
 (3) α が比較的小さい場合、免震周期を長くすると制御力に対するガストファクターは大きくなる傾向がある。
 (4) α が比較的大きい場合、免震周期を長くしても制御力に対するガストファクターは変化しない。

6. まとめ

本研究では数値シミュレーションせずに制御系の平均制御力と平均変位を予測する方法を導出する。また、最大制御力と最大変位を理論的に予測するガストファクター手法を提案した。さらに、数値例を用いて提案された方法の妥当性を示した。本報で得られた知見を以下に示す。

- (1) 重み指数 α を大きくすると、制御系の平均制御力が大きくなり、平均変位が小さくなる。
 (2) 免震建築物にアクティブ制御を併用することにより、風方法風力で免震層変位をマイナス方向まで抑えることができる。
 (3) 重み指数 α を大きくすると、変位に対するガストファクターと制御力に対するガストファクターの両方が小さくなる傾向がある。
 (4) 重み指数 α が比較的大きい場合、ガストファクターの値は建築物の免震周期に依存しない。

謝辞

本研究の一部は科研費(201923456)の助成を受けたものであり、一部はJST産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(JPMJOP1723)によるものである。

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) 吉岡宏和，スパンサー Jr., B.F.：MRダンパーを用いたスマート免震構造の振動台実験，理論応用力学講演会公演論文集，pp. 65-66，2002. 5
- 3) Kim Hyun-Su, Roschke N. Paul: GA-fuzzy control of smart base isolated benchmark building using supervisory control technique. Advance in Engineering Software, Vol.38, pp. 453-465, 2007. 7
- 4) Daiki Sato, Yinli Chen, Kou Miyamoto, Jinhua She: A spectrum for estimating the maximum control force for passive-base-isolated buildings with LQR control, Engineering Structures, Vol. 199, 2019.9.
- 5) 日本鋼構造協会：構造物の耐風工学，1997. 11
- 6) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015. 2
- 7) 佐藤大樹，笠井和彦，田村哲郎：粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響，日本建築学会構造系論文集，第635号，pp. 75-82，2009. 1
- 8) 丸川比佐夫，大熊武司，北村春幸，吉江慶祐，鶴見俊雄，佐藤大樹：風洞実験に基づく高層建築物の多層層風力によるエネルギー入力性状 その2 矩形高層建築物に作用する層風力特性，日本建築学会学術講演梗概集，Vol. B-1, pp.193-194, 2010. 7
- 9) 森泰親：わかりやすい現代制御理論，2016. 2
- 10) 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

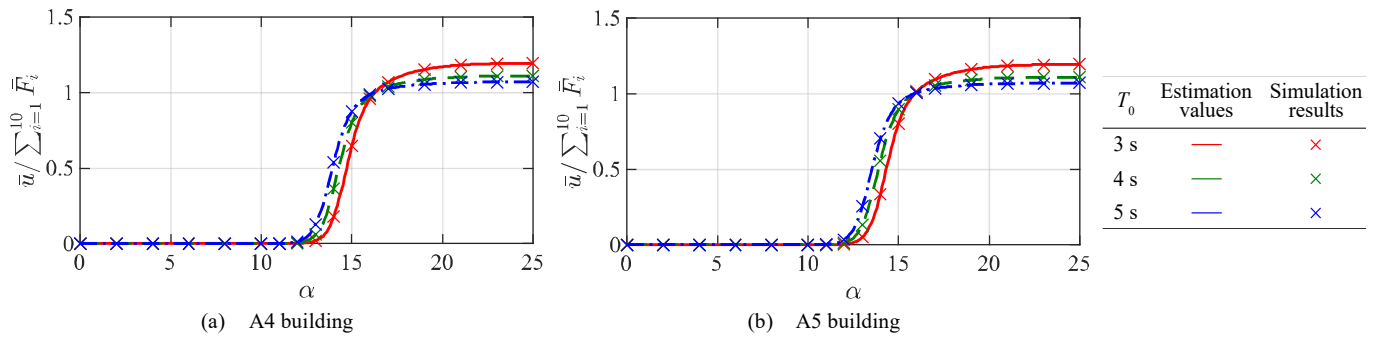


Fig. 5 Mean control force: estimation values vs. simulation values

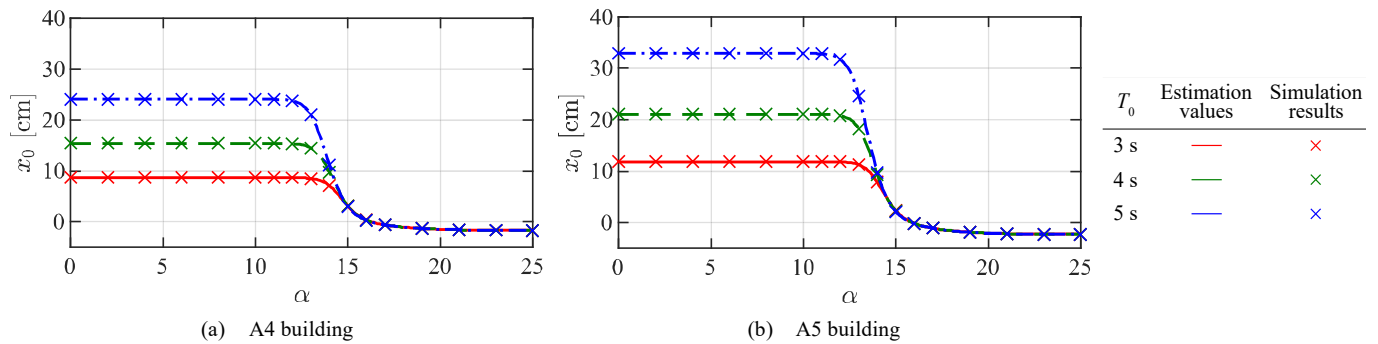


Fig. 6 Mean displacement response of PBI story: estimation values vs. simulation values

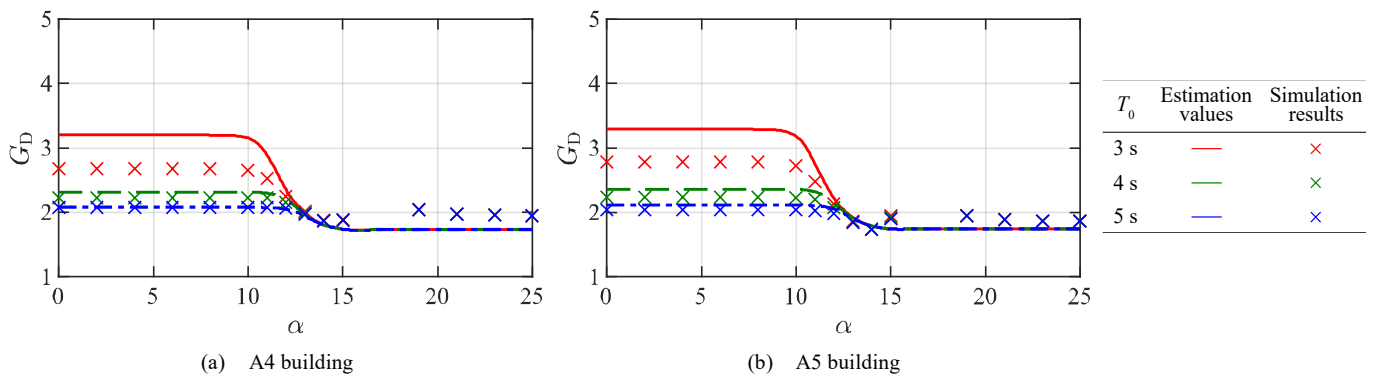


Fig. 7 Gust factor for displacement: estimation values vs. simulation values

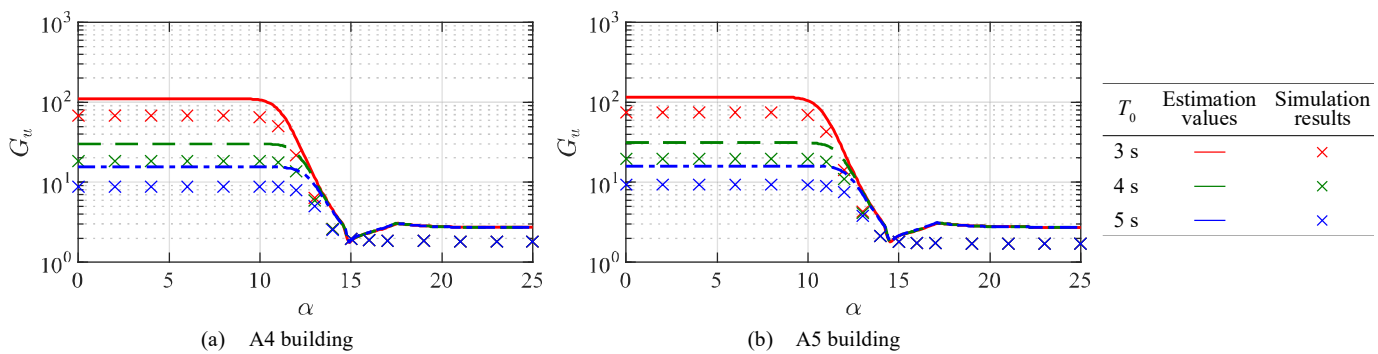


Fig. 8 Gust factor for control force: estimation values vs. simulation values

*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 清水建設技術研究所 研究員・工博

*4 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.

Researcher, Institute of technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

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