

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	絶対加速度制御型の等価入力外乱の制御系設計(その1：外乱除去メカニズムの考察)
Title(English)	Estimation of Equivalent-input-disturbance by response spectrum (Part 1: Mechanism of disturbance rejection)
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(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , pp. 409-410
Citation(English)	Summaries of technical papers of annual meeting, , pp. 409-410
発行日 / Pub. date	2018, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

絶対加速度制御型の等価入力外乱の制御系設計
(その1: 外乱除去メカニズムの考察)

アクティブ制御 等価入力外乱 振動制御
2自由度制御系 絶対加速度

正会員 ○宮本皓*1 同 佐藤大樹*1
同 陳引力*1 同 余錦華*2

1. はじめに

アクティブ制御による建築物の振動制御に関する研究が近年盛んに行われており、近年では、外乱の影響を予測し、それを制御に用いる等価入力外乱が筆者らを中心として応用されている(例えば1, 2)。等価入力外乱を用いた制御系は従来のフィードバック制御に等価入力外乱推定器を取り付けたものであり、従来のフィードバック制御よりも、よい制御性能が期待される。等価入力外乱手法はロボティクスの運動制御のために開発されたものであるが、筆者らにより、建築物の振動制御に適用できるように、絶対加速度を抑える新しい等価入力外乱の制御系が提案された³⁾。

等価入力外乱の制御系はオブザーバ(状態推定器)とフィードバックゲインの2部分より構成されるが、現状では、これらの設計方針は未整備の状態であり、設計が困難である。

本報その1では、外乱から出力までの伝達関数を明らかにすることで外乱除去のメカニズムを明らかにし、その2では、それを元に、オブザーバゲインの設計方法の検討を行う。

2. 等価入力外乱

アクティブ制御入力 $u(t)$ をもつ建築物の運動方程式は式(1)により表される。

$$M_S \ddot{x}(t) + D_S \dot{x}(t) + K_S x(t) = M_S \{1\} \ddot{x}_g(t) - E_u u(t) \quad (1)$$

ここで $x(t)$ は各層の相対変位より構成されるベクトルであり、 M_S は質量マトリックス、 D_S は減衰マトリックス、 K_S は剛性マトリックスを表し、 E_u は制御入力マトリックスであり、物理的にはアクチュエータの位置を表す。

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。

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

ただし、ここで

$$\begin{cases} z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}, & A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M_S^{-1}K_S & -M_S^{-1}D_S \end{bmatrix}, \\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ M_S^{-1}E_u \end{bmatrix}, & B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ -\{1\} \end{bmatrix} \end{cases}$$

であり、 $\ddot{x}_g(t)$ は地動加速度である。

式(2)をブロック線図によって表現すると図1のようなになる。

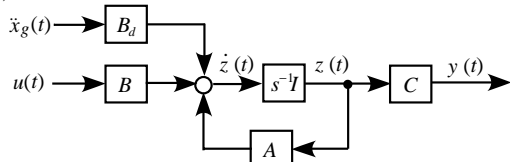


Fig. 1 Block diagram of structural model

ここで、 $y(t)$ は出力であり、

$$y = Cz(t) \quad (3)$$

により与えられる。ここで、 C は出力マトリックスを表し、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。また、図中の s はラプラス

演算子を表す。なお、 (A, B) は可制御、 (A, C) は可観測であるとする。

次に、図2のような制御系について考慮してみる。

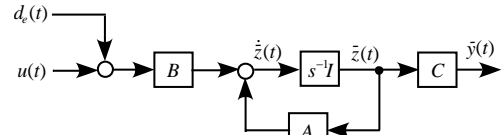


Fig. 2 System with equivalent-input-disturbance

図1のような制御対象において、外乱 $\ddot{x}_g(t)$ 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2となる。この時、等価入力外乱をもつ制御対象の状態を $\bar{z}(t)$ とし、出力を $\bar{y}(t)$ とする。

$\bar{y}(t) = y(t)$ が成り立つとき、 $d_e(t)$ を $\ddot{x}_g(t)$ 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により、外乱による応答を抑制することができる。

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、文献3)より、出力に絶対加速度を含ませるような必要があり、直達項 D を取り付け、以下のように C と D を設定することで絶対加速度を出力することができる(図3)

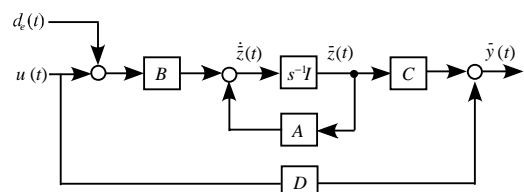


Fig. 3 Concept of new EID

ここで、

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

$$C = [-M_S^{-1}K_S \quad -M_S^{-1}D_S], \quad D = M_S^{-1}E_u \quad (5)$$

このとき、等価入力外乱を持つ制御系全体は図4のように表される。

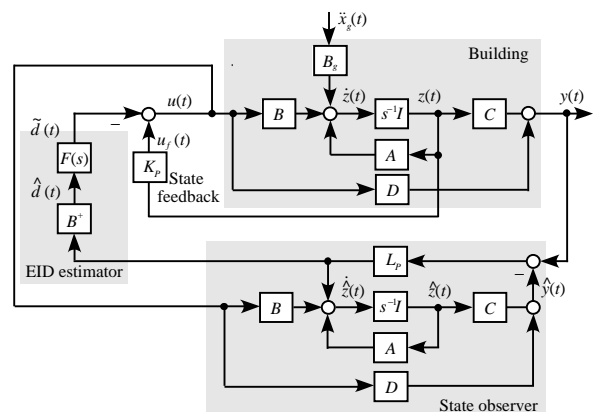


Fig. 4 Configuration of system.

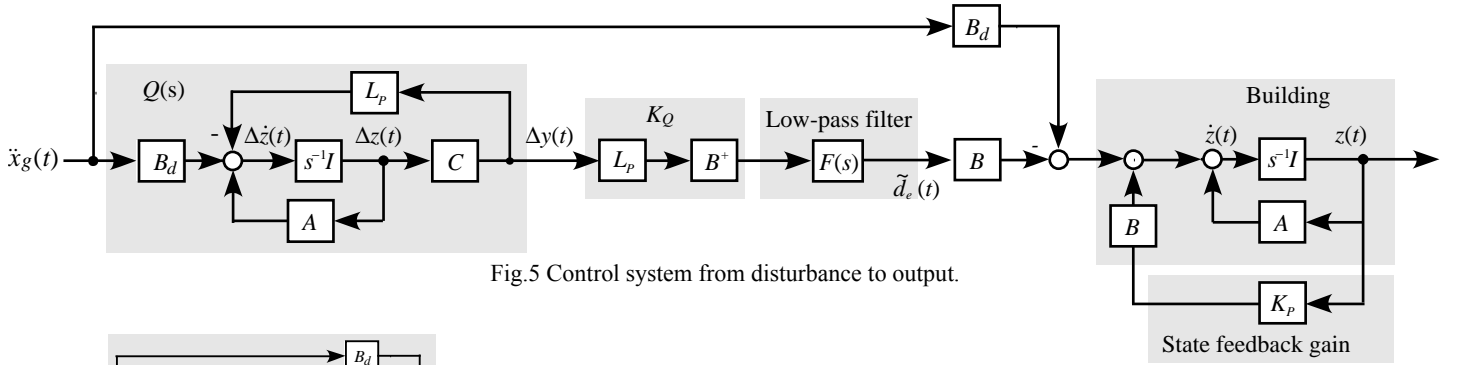


Fig.5 Control system from disturbance to output.

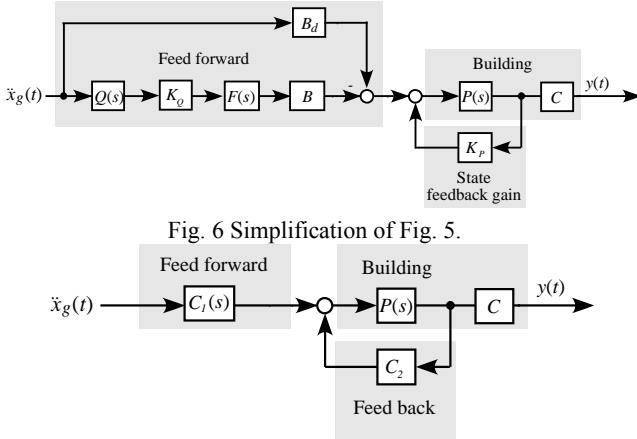


Fig. 6 Simplification of Fig. 5.

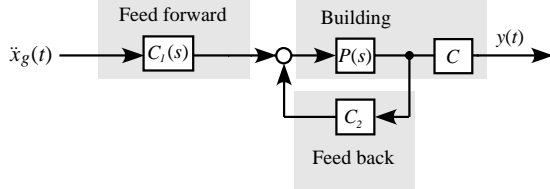


Fig. 7 Configuration of two-degree-of-freedom control system.

図4において、 $F(s)$ はローパスフィルターであり、 B^+ は行列 B の擬似逆行列であり、

$$B^+ = \frac{B^T}{B^T B} \quad (6)$$

により与えられ、 K_p は $u(t) = K_p z(t)$ の制御則を持つフィードバックコントローラゲインであり、例えば、最適制御などで設計される。

図4に用いられているオブザーバの状態方程式はオブザーバゲイン L_p を用いて式(7)で表される。

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}(t) = A\hat{z}(t) + Bu(t) + L_p C[z(t) - \hat{z}(t)] \\ \hat{y}(t) = C\hat{z}(t) + Du(t) \end{cases} \quad (7)$$

ここで制御対象の状態 $z(t)$ とオブザーバの状態 $\hat{z}(t)$ との差を

$$\Delta z(t) = z(t) - \hat{z}(t) \quad (8)$$

と定義し、式(2), (7), (8)より、以下の式(9)を得る。

$$\begin{cases} \dot{\Delta z}(t) = (A - L_p C)\Delta z(t) + B_d \ddot{x}_g(t) \\ y = C\Delta z(t) \end{cases} \quad (9)$$

式(2), (8), (9)を用いて、図4を図5のように書き換え、外乱入力チャンネル B_d から出力までの伝達関数について考察を行う。

図5より外乱入力チャンネル B_d から入力される外乱(本研究では地動加速度)は、制御対象の建築物に入力する前に、制御入力チャンネル B から入力する推定等価入力外乱 $\tilde{d}_e(t)$ により抑えられ、両者の差分がコントローラゲイン K_p より生成されるフィードバック制御入力によって更に抑えられる制御系になっていることが明らかになった。

ここで、図5をさらに図6, 7のようにまとめる。ただし、ここで図中の $Q(s)$, K_Q と $P(s)$ は以下の伝達関数である。

$$Q(s) = C[sI - (A - L_p C)]^{-1} B_d \quad (10)$$

$$K_Q = L_p B^+ \quad (11)$$

$$P(s) = (sI - A)^{-1} B \quad (12)$$

ただし、ここで、 s はラプラス変換による演算子である。以上より、絶対加速度抑制型の等価入力外乱を用いた場合、外乱入力から出力 $y(t)$ までについて、オブザーバやローパスフィルター等から構成される部分 $C_1(s)$ は外乱に対してフィードフォワード制御と同等の働きをし、フィードバックゲイン K_p (C_2)は従来の制御系と同様にフィードバック制御の働きをすることが分かる。

以上の事から、本制御系は、外乱から出力 $y(t)$ に対しては、フィードフォワード制御とフィードバック制御を組み合わせた2自由度の制御系であり、外乱除去のメカニズムとしては、オブザーバやローパスフィルター等から構成されるフィードフォワード制御部分により、外乱が抑制され、その後、フィードバック制御部分で更に制御を行う構成になっていることが明らかになった。言い換えれば、フィードバック制御に、フィードフォワード制御部分を取り付けられた制御系であることから、従来から用いられている通常のフィードバック制御よりもより高い制御性能が得られることが期待できる。

オブザーバゲインやフィードバックゲインの設計の際は、フィードフォワード制御部分と、フィードバック制御部分のそれぞれが所望の周波数応答特性を持つように、オブザーバゲインとフィードバックゲインを調整することで、所望の特性をもつ制御系が実現される。

3. まとめ

本報その1では、等価入力外乱の設計の見通しをよくし、より容易にすることを目的として、絶対加速度抑制型の等価入力外乱の外乱除去メカニズムを明らかにした。その結果、本制御系は、外乱に対してフィードフォワード制御部分とフィードバック制御の2つのコントローラより構成される、2自由度の制御系であることが分かった。これは、従来のフィードバック制御にフィードフォワード制御部分を追加した形式となっており、従来のフィードバック制御よりも、よりよい制御性能が得られることが期待される。

参考文献

- 1) Kou Miyamoto et al, Equivalent-input-disturbance approach to active structural control for seismically excited buildings. Engineering Structures, Vol. 125, pp. 392-399, 2016
- 2) Jinhua She et al, Active structural control with input dead zone based on equivalent-input-disturbance approach, IECON 2010, 2010.
- 3) 宮本皓 他, 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, 日本建築学会関東支部, pp. 389-392, 2018年

*1 東京工業大学
*2 東京工科大学

*1 Tokyo Institute of Technology
*2 Tokyo University of Technology