

การควบคุมแบบเหมาะสมชั่วขณะสำหรับ โครงสร้างที่ถูกกระทำด้วยแรงแผ่นดิน ไหวแบบเฟ้นสุ่ม

ผศ.ดร.สงวน วงษ์สวัสดิกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยวงษ์สวัสดิกุล นครราชสีมา

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการเสนอวิธีการควบคุมโครงสร้างชนิดเชิงเส้น ที่ถูกกระทำโดยแรงแผ่นดินไหวแบบเฟ้นสุ่ม เน้นความสำคัญสำหรับอาคารที่ถูกควบคุมโดย active bracing แผ่นดินไหวกำหนดให้มีแบบจำลองเป็น filtered white noise or shot noise และรวมอยู่ในสมการการเคลื่อนที่ ผลของการชดเชยการป้อนไม่ข้างหน้า (feedforward compensation) รวมในสเตทการป้อนกลับ (state feedback loop) จะหาค่าวิธีการควบคุมเหมาะสมชั่วขณะ (instantaneous optimal control) ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ไม่ราบเรียบของพฤติกรรม (response) ถูกคำนวณโดยวิธี method of vectorization ตัวอย่างเชิงตัวเลขถูกแสดงสำหรับการควบคุมอาคารหลายชั้นที่ถูกควบคุมด้วย active bracing

Instantaneous Optimal Control For Structures Under Stochastic Seismic Loads

Dr.Sanguan Vongchavalitkul

Assistant Professor

Department of Civil Engineering Faculty of Engineering

Vongchavalitkul University Nakhon Rachasima

Abstract

This paper presents a method of controlling linear civil engineering structures subjected to stochastic earthquake ground excitations. Emphasis is placed on control of active bracing buildings. The earthquake ground motion is modeled as a filtered white noise or shot noise and the equations of motion of the structure are augmented by the earthquake model. This results in a feedforward compensation in addition to state feedback loop as obtained using the instantaneous optimal control algorithm. The nonstationary mean square response is computed using the method of Vectorization. Numerical examples for control of multi-story active bracing buildings are worked out to demonstrate the applications of the control method.

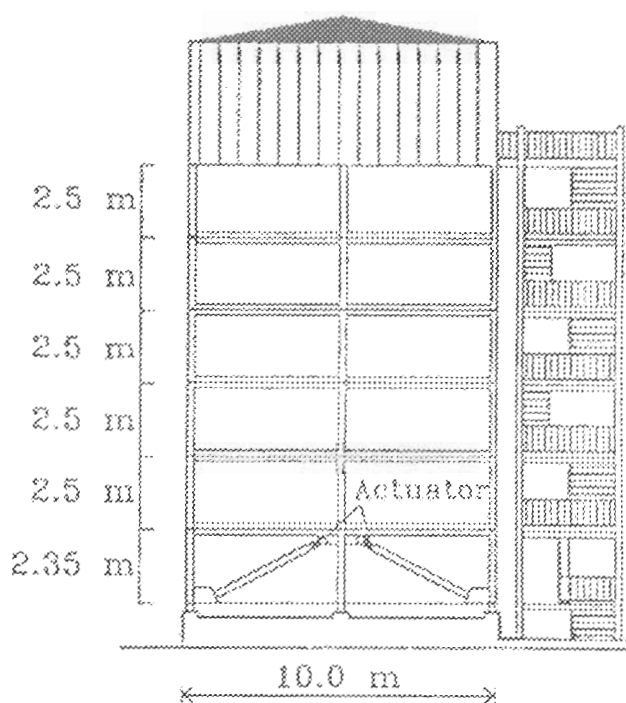
บทนำ

การควบคุมโครงสร้างในงานวิศวกรรมแบบ active control ปัจจุบันเป็นสิ่งที่น่าสนใจมีการทดลอง และทำวิจัยกันอย่างแพร่หลาย ดังปรากฏในบทความฉบับรวมเล่ม โดยบทความต่างๆ ที่รวบรวมโดย ASCE ฉบับพิเศษ[1]

กลไกการควบคุมแบบเหมาะสมชั่วขณะ (instantaneous optimal control) ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับโครงสร้างที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นหรือ Hysteretic[2] ปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับการ

ควบคุมของโครงสร้างนั้นจะถูกกระทำจากแผ่นดินไหวในลักษณะ deterministic ซึ่งจริงๆ แล้วแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นควรที่จะกำหนดให้เป็นแบบ stochastic process ทั้งนี้เพราะว่ามันเป็นเหตุการณ์ที่แปรเปลี่ยนตลอดเวลา

ในบทความนี้จะนำเสนอกลไกควบคุมโครงสร้างที่เป็นเชิงเส้นถูกกระทำด้วยน้ำหนักบรรทุกสั่นสะเทือนพื้นสุ่ม (stochastic seismic load) โดยใช้วิธีการควบคุมแบบชั่วขณะเหมาะสมสำหรับน้ำหนักบรรทุก deterministic ความเร่งแผ่นดินไหวกำหนดให้เป็นแบบ filtered Gaussian shot noise ผลของสเตทเวกเตอร์ที่ได้จะมีทั้งสเตทป้อนย้อนกลับกับสเตทป้อนข้างหน้า (state feedback loop และ feedforward compensation) การประกันเสถียรภาพของระบบจะใช้วิธี Lyapunov Direct Method มาคำนวณหา Weighting Matrix; Q ตัวอย่างที่ใช้แสดงเป็นตึกหกชั้นมีระบบควบคุมเป็นแบบ active bracing



รูปที่ 1 แสดงลักษณะอาคารของบริษัท Takenaka

สมการการเคลื่อนที่

เมตริกซ์สมการการเคลื่อนที่ของอาคารลักษณะ shear-beam building ที่ติดตั้งระบบควบคุมแบบ active bracing ดังรูปที่ 1 ถูกกระทำด้วยแผ่นดินไหวมิติเดียวที่มีความเร่ง $\ddot{X}_0(t)$

$$\overline{M}\ddot{\overline{Y}}(t) + \overline{C}\dot{\overline{Y}}(t) + \overline{K}\overline{Y}(t) + \overline{H}\overline{U}(t) + \overline{F}\ddot{X}_0(t) \quad (1)$$

โดยที่ $\overline{Y} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_n]^T$ เป็น n-vector ซึ่ง $y_j(t)$ คือ relative displacement ของชั้น j ที่เทียบกับพื้น; \overline{M} เป็นเมตริกซ์ทแยงขนาด $(n \times n)$ ที่มีสมาชิกทแยงที่ j คือ มวลของชั้นที่ j ; \overline{K} และ \overline{C} เป็นเมตริกซ์ขนาด $(n \times n)$ ของสติเฟนสและ damping, \overline{H} เป็นเมตริกซ์ขนาด $(n \times n)$ ที่กำหนดตำแหน่งและ $\overline{F} = -[m_1, m_2, \dots, m_n]^T$ เครื่องหมาย “ / ” แทน transpost matrix

สมการเมตริกซ์ลำดับที่สองปรากฏในสมการที่ (1) นั้นสามารถแปลงเป็นสมการเมตริกซ์ลำดับที่หนึ่งได้โดยใช้ $2n$ เวกเตอร์สถานะ $\overline{Z}(t)$

$$\dot{\overline{Z}}(t) = A\overline{Z}(t) + \overline{B}\overline{U}(t) + \overline{W}_1\ddot{X}_0(t) \quad (2)$$

ซึ่ง $\overline{Z}(t)$ เป็น $2n$ เวกเตอร์สถานะ

$$\overline{Z}(t) = \begin{Bmatrix} \overline{Y}(t) \\ \dot{\overline{Y}}(t) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

และ

$$A = \begin{bmatrix} \overline{O} & \overline{I} \\ -\overline{M}^{-1}\overline{K} & -\overline{M}^{-1}\overline{C} \end{bmatrix}; \quad \overline{B} = \begin{bmatrix} \overline{O} \\ \overline{M}^{-1}\overline{H} \end{bmatrix}; \quad \overline{W}_1 = \begin{bmatrix} \overline{O} \\ \overline{M}^{-1}\overline{F} \end{bmatrix}$$

แบบจำลองความเข็งแผ่นดินไหว

แบบจำลองความเร่งแผ่นดินไหว $\ddot{X}_0(t)$ ในที่นี้จะให้เป็น filtered shot noise

$$\ddot{X}_0(t) = 2\overline{\xi}_g \overline{w}_g \dot{y}_d(t) + \overline{w}_g^2 y_d(t) \quad (4)$$

โดยที่ y_d , $\overline{\xi}_g$, \overline{w}_g เป็นการขจัด อัตราส่วน damping และความถี่ธรรมชาติ ตามลำดับ

$$\ddot{y}_d(t) + 2\xi_g w_g \dot{y}_d(t) + w_g^2 y_d(t) = \varphi(t)\eta(t) \quad (5)$$

ซึ่ง $\varphi(t)$ เป็น deterministic non-negative envelope function $\eta(t)$ เป็น stationary Gaussian White Noise ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และ power spectral density, S_o

สมการที่ (4) และ (5) สามารถเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ว่า

$$\ddot{X}_0(t) = \overline{D}_d Z_d(t) \quad (6)$$

$$\dot{Z}_d(t) = A_d Z_d(t) + \overline{C}_d(t) \quad (7)$$

โดยที่

$$\overline{Z}_d(t) = \begin{Bmatrix} \overline{Y}_d(t) \\ \overline{\dot{Y}}_d(t) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\overline{D}_d = \begin{bmatrix} w_g^2 & | & 2\xi_g w_g \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$A_d = \begin{bmatrix} 0 & | & 1 \\ -w_g^2 & | & -2\xi_g w_g \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\overline{C}_d(t) = \begin{Bmatrix} 0 \\ \varphi(t)\eta(t) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

รวมสมการการเคลื่อนที่ทั้งหมดโดยใช้ $2n+2$ เวกเตอร์สถานะ

$$\overline{\overline{Z}} = \begin{Bmatrix} Z(t) \\ \overline{Z}_d(t) \end{Bmatrix} \quad (12)$$

ได้ว่า

$$\dot{\overline{\overline{Z}}}(t) = \overline{\overline{A}} \overline{\overline{Z}}(t) + \overline{\overline{B}} \overline{U}(t) + \overline{\overline{C}}_d(t) \quad (13)$$

การควบคุมแบบเหมาะสมที่รับ Stochastic Load

สมการที่ (13) สามารถหาผลลัพธ์แบบเชิงตัวเลขได้ว่า

$$\overline{\overline{Z}}(t) = \overline{\overline{T}} \overline{\overline{D}}(t - \Delta t) + \phi \overline{\overline{B}} \overline{U}(t) + \phi \overline{\overline{C}}_d(t) \quad (14)$$

ซึ่ง T เป็น model matrix ขนาด $(2n+2) \times (2n+2)$ ที่มีสมาชิกเป็น Eigenvector ของ $\overline{\overline{A}}$, $\overline{\overline{D}}(t - \Delta t)$ เป็นเวกเตอร์ปริมาณที่ $t - \Delta t$ และ $\phi = \Delta t / 2$

ดัชนีสมรรถนะที่ขึ้นกับเวลา $J(t)$ ถูก minimize แบบค่าเฉลี่ย

$$J^*(t) = E[J(t)] \quad (15)$$

เมื่อ
$$J(t) = \bar{Z}'(t)\bar{Q}\bar{Z}(t) + \bar{U}'(t)\bar{R}U(t) \quad (16)$$

โดยที่ \bar{Q} และ \bar{R} เป็น weighting matrices ที่มีมิติ $[(2n+2) \times (2n+2)]$ และ $(r \times r)$ ตามลำดับ

เวกเตอร์ควบคุม $U(t)$ ที่ได้คือ

$$\bar{U}(t) = -\phi\bar{R}^{-1}[\bar{B}' \quad \bar{O}] \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Z}(t) \\ \bar{Z}_d(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\bar{U}(t) = -\phi\bar{R}^{-1}\bar{B}'\bar{Q}_{11}\bar{Z}(t) - \phi\bar{R}^{-1}\bar{B}'\bar{Q}_{12}Z_d(t) \quad (18)$$

$$\bar{U}(t) = \bar{G}_1\bar{Z}(t) + \bar{G}_2Z_d(t) \quad (19)$$

เมื่อ G_1 เป็น feedback gain, G_2 เป็น feedforward gain และ $Z_d(t) = [Y_d, \dot{Y}_d]'$ เพื่อยืนยันความเสถียรภาพของตัวควบคุม G_1 และ G_2 ทาจาก Lyapunov's Direct Method จากการแนะนำของ Yang [3] เมื่อ

$$\begin{aligned} G_1 &= -\phi\bar{R}^{-1}\bar{B}'\bar{Q}_{11} \\ G_2 &= -\phi\bar{R}^{-1}\bar{B}'\bar{Q}_{12} \end{aligned} \quad (20)$$

พฤติกรรมแบบพินสุ่มของโครงสร้างที่ถูกควบคุม

เนื่องจากอินพุตเข้าสู่ระบบเป็น stochastic process ที่มีค่าเฉลี่ยศูนย์ ดังนั้น พฤติกรรมของการควบคุมโครงสร้างก็เป็น stochastic process เหมือนกันที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ โดยการหา Covariance Matrix ของพฤติกรรมของโครงสร้าง เพื่อให้การคำนวณสะดวกขึ้น สมการเมทริกซ์จะถูกแปลงเป็นสมการเวกเตอร์โดยวิธี Vectorization

ตัวอย่างการทดลองเชิงตัวเลข

เพื่อเป็นการแสดงสมรรถนะการควบคุมของวิธีการที่ได้กล่าวมาข้างต้น ติ๊กบริษัท Takenaka ในประเทศญี่ปุ่นถูกนำข้อมูลกายภาพมาใช้ในการทดลอง ซึ่งข้อมูลนี้ปรากฏอยู่ในรายงานวิจัยอ้างอิง

หมายเลข[3] มวลของแต่ละชั้นหนักเท่ากันคือ 100 ตัน ความถี่ธรรมชาติของอาคารหลังนี้ในแต่ละชั้นคือ 0.943 2.765 4.876 7.279 10.114 และ 14.423 Hz. อัตราส่วนความหน่วงสำหรับการสั่นสะเทือนในแต่ละโมดคือ 1% ตึกหลังนี้สูง 6 ชั้น มีสองคานา ในชั้นที่ 1 มีการติดตั้ง active bracing วางทำมุมเฉียง $\theta = 51.5^\circ$

แผ่นดินไหวที่นำมาใช้เป็นแบบ nonstationary random process ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4 พารามิเตอร์ของ envelope function, filter และ power spectral density ของ White Noise กำหนดให้เป็นดังนี้ $t_1 = 3$ sec, $t_2 = 13$ sec, $c = 0.26$ sec⁻¹, $\xi_R = 0.65$, $\omega_g = 18.85$ rad/sec และ $S_0 = 117.156$ cm²/sec⁴

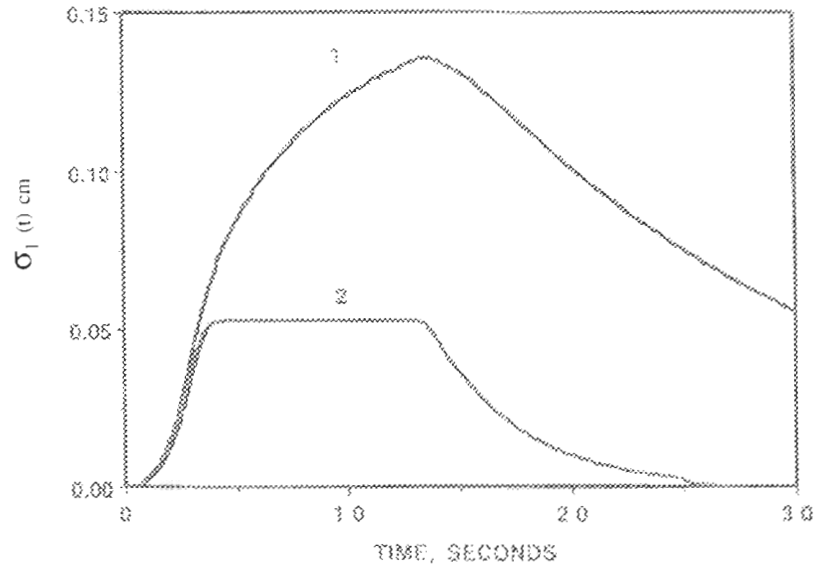
ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 1 รูปที่ 2 และ 3 จะเห็นว่าพฤติกรรมการเสียรูปสัมพันธ์ (relative displacement) ในรูปของ Root-Mean-Square ลดจากการไม่ถูกควบคุม

ตารางที่ 1

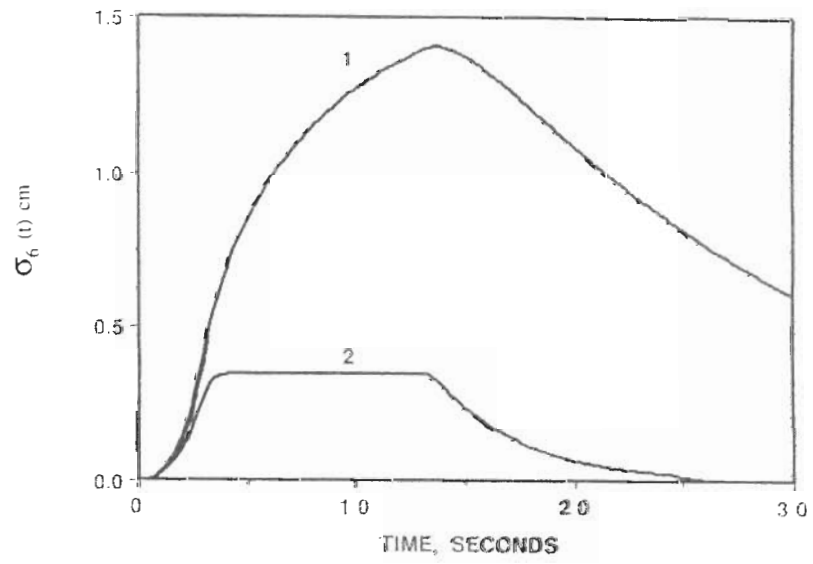
ค่า Root-Mean-Square สูงสุดของการตอบสนองของโครงสร้างและแรงควบคุม

$\bar{\sigma}$	Without Control	With Active Control
$\bar{\sigma}_1$, cm	0.136	0.053
$\bar{\sigma}_6$, cm	1.404	0.350
$\bar{\sigma}_u$, kN	0	243.70

เมื่อ $\bar{\sigma}_1$ = ค่า RMS สูงสุดของชั้นที่ 1, $\bar{\sigma}_6$ = ค่า RMS สูงสุดของชั้นบนสุด, $\bar{\sigma}_u$ = ค่า RMS สูงสุดของแรงควบคุม



รูปที่ 2 Root-Mean-Square ของการเสียรูปสัมพัทธ์ชั้นแรก (relative displacement)
1 : Without Control 2 : With Control



รูปที่ 3 Root-Mean-Square ของการเสียรูปสัมพัทธ์ชั้นบนสุด (relative displacement)
1 : Without Control 2 : With Control

สรุป

จากผลการนำเอาข้อมูลแผ่นดินไหวมาใช้ในการควบคุมอาคาร ได้ผลการควบคุมอาคารเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากข้อมูลการที่จะทำจริงในการวัดความเร่งของแผ่นดินไหวในตอนที่เกิดขึ้นจริงก็จะเป็นการยากที่จะบอกว่าจะมีความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ในแบบจำลองที่จะใช้ออกแบบระบบถูกต้องเพียงใด แต่จากการนำเอาการชดเชยไปข้างหน้าเข้ามารวมกับการชดเชยป้อนกลับในแวกเตอร์ควบคุมให้ผลเป็นที่น่าพอใจเหมือนกับการนำให้การชดเชยป้อนกลับเพียงอย่างเดียว

เอกสารอ้างอิง

- [1] G.W. Housner, L.A. Bergman, T.K. Caughey, A.G. Chassiakos, R.O. Claus, S.F. Masri, R.E. Shelton, T.T. Soong, B.F. Spencer, J.T.P. Yao, **"Structural Control: Past, Present, and Future"**, J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.123, No.9, pp. 897-971 (1998).
- [2] J.N. Yang, A. Akbrapour and P. Ghaemmaghami, **"New Optimal Control Algorithms for Earthquake Excited Building Structures"**, J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.113, No.9, pp.1369-1368 (1987).
- [3] J.N. Yang, Z. Li and S. Vongchavalitkul, **"A Generalization of Optimal Control Theory : Linear and Nonlinear Control"**, NCEER Technical Report (1992).