

신경회로망 예측 제어시스템을 이용한 다층 구조물의 진동제어에 관한 연구

A Study on the Vibration Control of Multi-story Structure using Neural Network Predictive Control System

조 현 철* , 이 진 우, 이 영 진, 이 권 순
동아대학교 전기공학과

Hyun C. Cho* , Jin W. Lee , Young J. Lee and Kwon S. Lee
Dept. of Electrical Eng. Dong-A University, Pusan, Korea
Tel. : 051-200-7739, Fax. : 051-200-7743
E-mail : kslee@seunghak.donga.ac.kr

Abstract

In this paper, neural networks predictive PID (NNPPID) control system is proposed to reduce the vibration of structure. NNPPID control system is made up predictor, controller, and self-tuner to yield the optimal parameters of controller. The neural networks predictor forecasts the future outputs based on present input and output of structure. The controller is PID type whose parameters are yielded by neural networks self tuning algorithm. Computer simulations show displacements of multi-story structures applied to NNPPID system about environmental load - wind forces and earthquakes.

1. 서 론

최근 건축자재의 발달과 시공기술의 발전으로 인하여 건축물은 고층화, 대형화, 유연 경량화의 추세로 가고 있으며, 이런 추세는 계속 증가되리라 예상되고 있다. 그러나, 이런 건축물들은 낮은 탄성과 높은 강도들로 특성지어지며, 풍력이나 지진과 같은 환경적 부하에 매우 민감하여 건축물은 진동을 일으키게 된다. 건축물의 진동은 거주자의 불쾌감은 물론, 건축물의 안전성에 상당한 영향을 미치며, 심지어 붕괴사고까지도 초래할 수 있다. 최근

지구상에 대형 건축물들의 붕괴사고가 자주 일어나고 있으며, 기상이변과 지진이 자주 발생하고 있어 건축물의 안전성 확보가 절실히 요구되고 있다.

현재 건축물의 진동을 억제하기 위한 연구가 활발히 진행중이며, 기존의 수동 제어방식에 비해 보다 효율적인 혼합 제어방식으로 진동을 억제하고 있다. 혼합 제어방식은 수동과 능동제어방식의 장점으로 구성한 시스템으로 수동방식에 비해 적은 제어에너지를 요구하며 여러 가지 제어이론을 접목시켜 원하는 사양과 목적에 맞는 시스템을 구성할 수 있는 장점이 있다[1].

현대 제어이론의 눈부신 발달로 인하여 여

러 가지 제어이론들이 연구·발표가 되었으며, 건축물의 진동제어에 많은 적용되어 왔다. 그러나, 기존의 선형 제어기법은 비선형성을 많이 내포하고 있는 건축물에 대하여 그다지 우수한 제어성능을 기대하기가 어렵다. 선형 제어기법은 비선형 시스템을 선형화로 전환하여 해석하기 때문에 비선형성에 대한 동특성을 충분히 표현하기가 어렵기 때문이다. 따라서, 비선형성에 대한 수학적 표현과 해석이 용이하며, 그 동특성을 충분히 내포할 수 있는 지능 제어기법을 현재는 많이 이용을 하고 있다. 지능 제어기법은 인간의 사고와 생태학적 구조를 본 따서 구성된 퍼지논리, 유전 알고리즘, 신경회로망 등을 제어이론에 접목한 것이다. 특히, 신경회로망은 인간의 두뇌 및 신경구조 모델을 본 따서 구성한 알고리즘으로써 복잡하고 광대한 정보량을 적절하고 유효하게 처리할 뿐만 아니라, 미지의 구조를 학습 및 훈련을 통해 정확하게 제어를 할 수도 있다. 신경회로망의 구조는 간단한 연산자(operator)와 연결강도로만 구성되어 매우 단순한 구조와 비교적 쉬운 수학적 표현이 가능하며, 연결강도를 학습시킴으로써 자기구성(self-organizing) 능력을 가지게 되어, 시스템 자체나 외부 환경에서 발생하는 변화에 대해 적응능력이 뛰어난 것으로 알려져 있다[2].

본 논문에서는 신경회로망을 이용한 예측 제어시스템을 구성하여 건축물의 진동제어에 적용을 하였다. 건축물은 8층 구조물로 하였으며, 바람이나 지진을 인가하였을 경우 나타나는 건축물의 변위를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 나타내었다. 그리고, 기존에 진동제어에 많이 적용되는 선형 제어시스템과 비교분석을 하였다.

2. 신경회로망 예측 PID 제어기

본 논문에서 제안한 신경회로망 예측 PID (NNPPID) 제어시스템에 대한 블록선도는 그림 1과 같다.

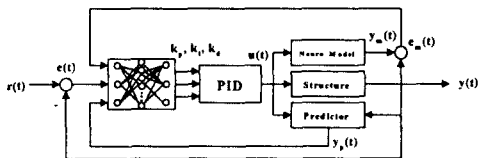


Fig. 1. Neural network predictive PID control system.

NNPPID 제어시스템은 신경회로망 예측기와 PID 제어기 그리고 제어기의 파라미터를 산출하는 신경회로망 자기동조기로 구성이 된다. 신경회로망 예측기가 구성되기 전 신경회로망은 건축물에 대한 모델링이 이루어져야 한다. 그림 2는 모델링에 대한 블록선도를 나타낸다.

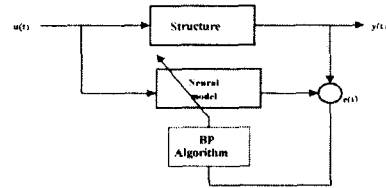


Fig. 2. Neural network modeling.

신경회로망 모델링은 건축물에 인가한 동일 입력에 대해 건축물의 출력과 신경회로망 모델의 출력에 대한 오차를 감소하는 방향으로 오프라인 학습을 하는 것을 말한다. 학습 알고리즘은 오차 역전파법(back-propagation)을 이용하였으며, 학습패턴은 건축물에 바람을 인가하였을 때 나타나는 응답변위(1층)로 하였다. 모델링 학습이 종료가 되면 건축물의 현재 입출력을 신경회로망의 입력패턴으로 하여 미래의 응답변위를 예측할 수 있다[3].

신경회로망 자기동조기(self-tuner)는 식 (1)의 오차함수를 줄이는 방향으로 온-라인 학습하여 제어기 파라미터를 산출한다.

$$E = \frac{1}{2} [r(t+1) - y_p(t+1)]^2 \quad (1)$$

여기서, $r(t+1)$ 는 설정치값이고, $y_p(t+1)$ 는 예측 출력값이다.

자기동조기로 이용된 신경회로망의 구조는 그림 3과 같다.

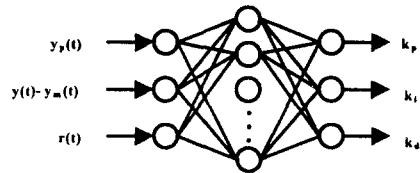


Fig. 3. Neural network self-tuner.

입력패턴으로는 예측출력, 건축물의 출력과

신경회로망 모델의 출력과의 오차 그리고 설정치와 출력오차로 하였으며, 출력층은 PID 제어기의 파라미터를 산출한다. 그리고, 신경회로망은 3층 구조로 하였으며, 각 층에 대한 노드 수는 3, 7, 3으로 하였다. 가중치의 초기값은 0.5~1사이의 랜덤한 값으로 하였으며, 학습율과 모멘트값은 각각 0.9와 0.5로 하였다. 학습법은 오차 역전파법으로 하였으며, 출력층과 은닉층사이의 가중치 변화량은 식 (2)와 식 (3)과 같다.

$$\Delta W_{jk}(t+1) = \alpha \delta_k o_j + \beta \Delta W_{jk}(t) \quad (2)$$

$$\Delta W_{ij}(t+1) = \alpha \delta_j o_i + \beta \Delta W_{ij}(t) \quad (3)$$

여기서, α 는 학습률(Learning rate)이고 β 는 모멘트 상수(Moment constant)이다. 그리고, o_j 와 o_i 는 출력층의 입력값과 은닉층의 입력값을 나타내며, δ_k 는 출력층의 오차신호이고 δ_j 는 은닉층의 오차신호로써 식 (4)의 PID 제어기에 대한 각각의 오차신호는 식 (5)와 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t)dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

여기서, k_p , k_i , k_d 는 제어기 파라미터로써 비례(proportional), 적분(integral), 미분이득(derivative gain)을 나타낸다.

$$\delta k_p = (r(t+1) - y_p(t+1)) \frac{\partial y_p(t+1)}{\partial u(t)} f'(netk_p) \frac{\partial u(t)}{\partial k_p}$$

$$\delta k_i = (r(t+1) - y_p(t+1)) \frac{\partial y_p(t+1)}{\partial u(t)} f'(netk_i) \frac{\partial u(t)}{\partial k_i} \quad (5)$$

$$\delta k_d = (r(t+1) - y_p(t+1)) \frac{\partial y_p(t+1)}{\partial u(t)} f'(netk_d) \frac{\partial u(t)}{\partial k_d}$$

$$\delta_j = \sum_k \delta_k W_{jk} f'(net_j) \quad (6)$$

여기서, k 는 출력층의 노드 수이며, $f(\cdot)$ 는 층의 출력에 대한 편미분식이고, $\frac{\partial y_p(t+1)}{\partial u(t)}$ 는 시스템의 자코비안을 나타낸다.

3. 다층 건축물의 모델

본 논문에서 구성한 제어시스템은 그림 4의 다층 건축물의 모델에 적용하여 진동을 제어하였다[4]. 건축물의 상층 부위에 부착이 된 제동시스템은 건축물과 같은 주파수 또는 위상차이(phase shift)로 진동을 하여 외란 에너

지를 운동 에너지로 변환함으로써 진동을 억제한다. m_1, m_2, \dots, m_n 은 각 층에 대한 건축물의 중량이며, c_1, c_2, \dots, c_n 과 k_1, k_2, \dots, k_n 은 건축물의 탄성과 제동을 나타내며, m_d, c_d, k_d 는 제동시스템에 대한 기호를 나타낸다. 그리고, f_1, f_2, \dots, f_n 은 각 층에 인가되는 풍력을 나타내며, \ddot{y}_0 는 그라운드(ground) 가속도로써 지진에 대한 기호를 나타낸다. 그리고, \textcircled{A} 는 액츄에이터(actuator)를 나타낸다.

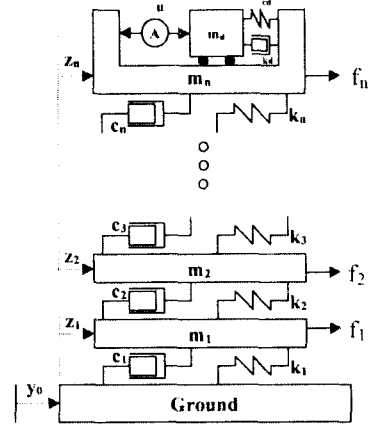


Fig. 4. Multi-story structure.

건축물의 운동방정식은 식 (7)과 같다.

$$m_1(\ddot{y}_0 + \ddot{z}_1) + c_1 \dot{z}_1 + k_1 z_1 - c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - k_2(z_2 - z_1) = f_1(t)$$

$$m_i(\ddot{y}_0 + \ddot{z}_i) + c_i(\dot{z}_i - \dot{z}_{i-1}) + k_i(z_i - z_{i-1}) + c_{i+1}(\dot{z}_i - \dot{z}_{i+1}) + k_{i+1}(z_i - z_{i+1}) = f_i(t) \quad (7)$$

$$m_n(\ddot{y}_0 + \ddot{z}_n) + c_n(\dot{z}_n - \dot{z}_{n-1}) + k_n(z_n - z_{n-1}) + c_d \dot{z}_d + k_d z_d = f_n(t) - u(t)$$

$$m_d(\ddot{y}_0 + \ddot{z}_s + \ddot{z}_d) + c_d \dot{z}_d + k_d z_d = u(t)$$

여기서, $i=2, \dots, n$ 이며, $z_i, \dot{z}_i, \ddot{z}_i$ 는 각 층에 대한 변위, 속도, 가속도를 각각 나타낸다. 그리고, 상태행렬을 식 (8)과 같이 정의하면 상태방정식은 식 (9)와 같다.

$$x(t) = \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ z \end{bmatrix} \quad w = \begin{bmatrix} f \\ \ddot{y}_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} u \quad (9)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M^{-1} & -M^{-1}m \end{bmatrix} w$$

여기서, M, C, K, z, f, u는 중량, 제동, 탄성 계수와 변위, 외란, 제어입력에 대한 벡터를 각각 나타내며, 다음과 같다.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & m_n & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & m_d \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & \dots & \dots & \dots \\ -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -c_{n-1} & c_{n-1}+c_n & -c_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & -c_n & c_n+c_d & -c_d \\ \dots & \dots & \dots & \dots & -c_d & c_d \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & \dots & \dots & \dots \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -k_{n-1} & k_{n-1}+k_n & -k_n \\ \dots & \dots & \dots & -k_n & k_n+k_d & -k_d \\ \dots & \dots & \dots & \dots & -k_d & k_d \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_{n-1} \ z_n \ z_d]^T \quad (13)$$

$$f = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_{n-1} \ f_n \ 0]^T \quad (14)$$

$$u = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ -1 \ 1]^T \quad (15)$$

$$m = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_{n-1} \ m_n \ m_d]^T \quad (16)$$

4. 시뮬레이션 및 결과 검토

시뮬레이션에 적용된 건축물은 8층 구조물로 하였으며, 피드백 제어와 LQ 최적제어도 함께 실시하여 응답특성을 비교분석 하였다.

피드백 제어에서 피드백 계수는 근래적 선도법을 이용하여 산출하였으며, 1000으로 선정하였다. 그리고, LQ 제어에서 상태 가중행렬 Q와 제어 가중행렬 R은 MATLAB을 이용하여 구하였으며, $Q = \begin{bmatrix} q_{11}I_{8 \times 8} & 0_{8 \times 10} \\ 0_{10 \times 8} & 0_{10 \times 10} \end{bmatrix}$, $R=0.0001$ 로 선정하였다. 여기서, $q_{11}=1 \times 10^5$ 이다.

시뮬레이션에 적용된 건축물의 파라미터는 표 1과 같다.

Table 1. The parameters of structures.

Floor	m [ton]	c [kN-sec/m]	k [kN/m]
Damper	172.8	76.98	843.97
8	345.6	196	1.37×10^6
7	345.6	243	1.69×10^6
6	345.6	298	2.07×10^6
5	345.6	348	2.43×10^6
4	345.6	386	2.69×10^6
3	345.6	410	2.85×10^6
2	345.6	467	3.26×10^6
1	345.6	490	3.40×10^6

바람은 식 (17)의 방정식을 이용하였다.

$$f_i = \frac{i}{n} p (3 \sin \omega t + 7 \sin 2\omega t + 5 \sin 3\omega t + 4 \sin 4\omega t) \quad (17)$$

여기서, n은 건축물의 전체 층수를 나타내며 i는 각 층을 나타낸다. 그리고, w는 바람의 기본 주파수(fundamental frequency)이며 p는 바람의 크기(magnitudes)를 나타낸다. 본 논문에서는 $w=1$ [rad/sec], $p=43.4$ [kn]으로 하였다. 그림 5는 8층에 인가되는 바람의 파형을 나타낸다. 그림 6은 지진파형으로 El Centro wave를 나타낸다.

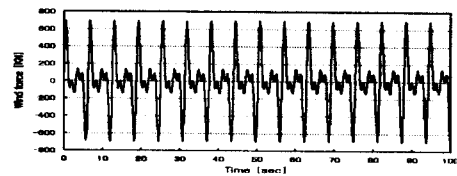


그림 5. wind forces.

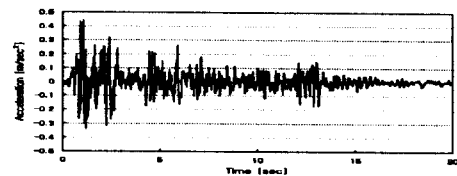
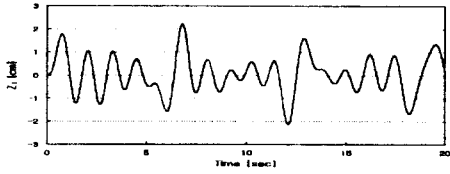
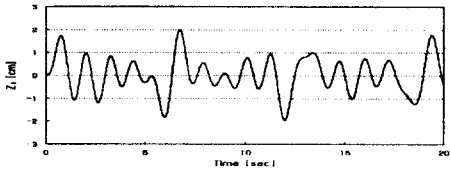


그림 6. El Centro wave.

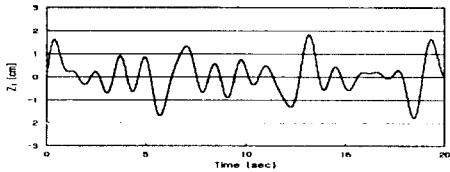
그림 7은 바람을 인가하였을 때 각각의 제어시스템에 대한 건축물의 1층 변위를 나타낸다. 그리고, 그림 8은 이 때의 제어에너지의 파형을 나타낸다.



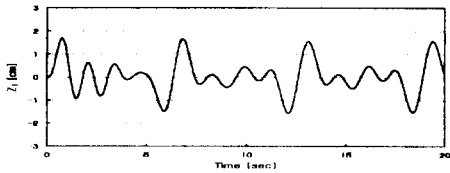
(a) Passive control (without control).



(b) Feedback control.

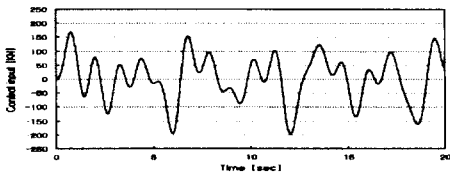


(c) LQ control.

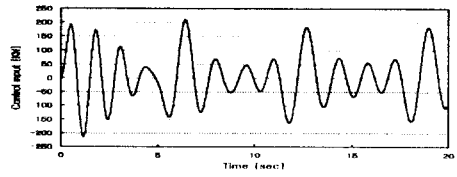


(d) NNPPID control.

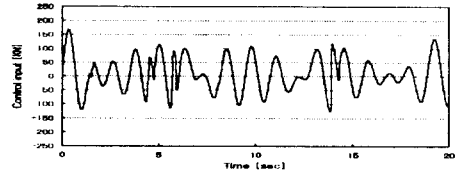
그림 7. Displacements for wind forces.



(a) Feedback control



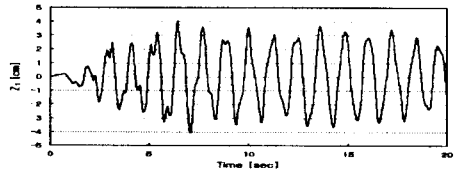
(b) LQ control.



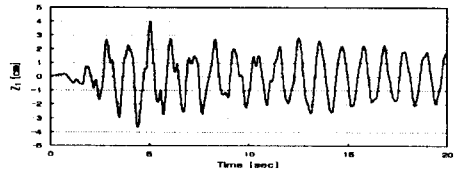
(c) NNPPID control.

그림 8. Control forces for wind forces.

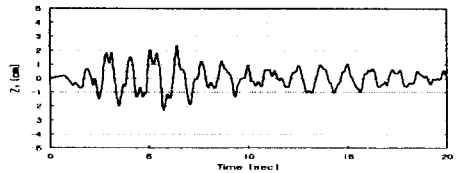
그리고, 그림 9는 El Centro wave를 인가하였을 때 각각의 제어시스템에 대한 건축물의 1층 변위를 나타낸다. 그리고, 그림 10은 이때의 제어에너지의 파형을 나타낸다.



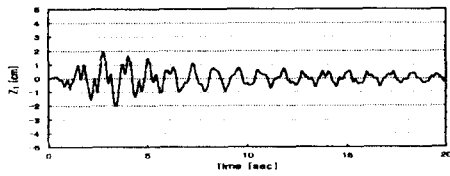
(a) Passive control (without control).



(b) Feedback control.

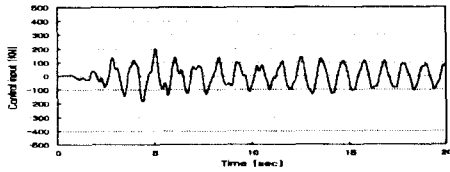


(c) LQ control.

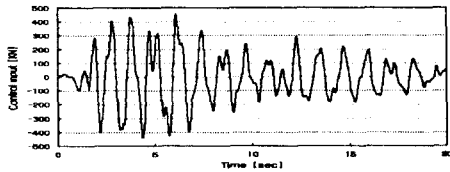


(d) NNPPID control.

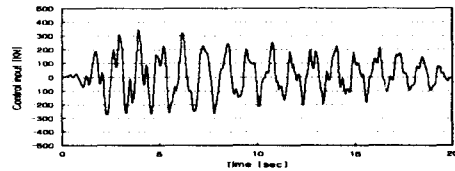
그림 9. Displacements for EL Centro.



(a) Feedback control.



(b) LQ control.



(c) NNPPID control.

그림 10. Control forces for EL Centro.

바람을 인가하였을 경우 NNPPID는 기존의 제어시스템보다 적은 제어에너지의 양을 산출하면서 가장 우수한 제어성능을 가진다. 이것은 NNPPID의 제어에너지가 매우 효율적으로 인가가 되어 제동시스템을 구동한다는 것을 알 수 있다. EL Centro의 경우에도 마찬가지로 NNPPID는 이 중 가장 우수한 제어성능을 가지는 것을 알 수 있다. 그러나, 제어에너지의 양에 있어서, 제어초기에 LQ 보다 적은 양을 가지지만, 전체적으로는 NNPPID는 가장 많은 양의 제어에너지를 산출한다. 표 2는 각각의 제어시스템에 대한 변위와 제어에너지 양에 대한 실효값(root mean square)을 나타낸다.

Table 2. Comparison displacements and control forces(RMS)

Controller	wind forces		EL Centro	
	disp.	control	disp.	control
Passive	0.83	-	1.98	-
Feedback	0.79	81.93	1.48	72.95
LQ	0.72	90.24	0.77	83.99
NNPPID	0.59	72.94	0.56	127.05

결론

본 논문은 신경회로망을 이용한 예측 PID 제어시스템을 구성하여 8층 건축물의 진동제어에 적용하였으며, 환경적 외란으로 바람이나 지진을 인가하였을 경우 발생하는 건축물의 변위를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 나타내었다. 그리고, 기존의 진동제어에 주로 이용되고 있는 제어기와 비교분석을 하여, 효율적인 제어 에너지로 우수한 제어성능을 가지는 것을 입증하였다. 향후 건축물의 동특성의 변화에도 적용 강인한 제어성능을 입증하고 실제 건축물의 모형을 제작하여 실시간 제어를 실시하고자 한다.

참고 문헌

- [1] L. Petti, T. T. Soong, B. Palazzo, "Hybrid mass dampers for structural control against wind and earthquakes," Proc. of the First World Conference on Structural Control, Vol. 2, pp. 110-118, 1994.
- [2] S. Omatu, M. Khalid, R. Yusof, *Neuro-Control and its Applications*, Springer, 1995, pp. 159-267.
- [3] D. Soloway, P. J. Haley, "Neural Generalized Predictive Control," NASA Technical Memorandum 110244, pp. 1-17, 1997.
- [4] A. C. Nerves, R. Krishnan, "A strategy for active control of tall civil structures using regenerative electric actuator," Proc. of the 11th ASCE Engineering Mechanics Specialty Conference, pp. 503-506, 1996.