

센서네트워크를 통한 분산제어와 초정밀 방진기 설계에 관한 이론적 접근

송봉섭(아주대 기계공학부)

Decentralized control via sensor network and its theoretical approach to design of an active vibration isolator

B. S. Song (Dept. of Mechanical Eng., Ajou Univ.)

ABSTRACT

Decentralized Dynamic Surface Control (DDSC) for a class of nonlinear systems interconnected via sensor network is presented in this paper. While a centralized design approach of DSC was developed in [1], the decentralized approach to deal with complex large-scale systems is proposed under the assumption that interconnected functions among subsystems are known via sensor network. As shown in [2], the separation principle for DDSC will allow us to design an estimation filter independently. Furthermore, the theoretical results are used to design and simulate an active vibration isolator under the assumption that many embedded sensors are distributed and communicate each other via wireless communication.

Key Words : English Key Word: Sensor network (센서네트워크), Decentralized control (분산제어), Dynamic surface control (동적 표면 제어), vibration isolator (방진기)

1. 서론

최근 급속도로 발전하는 미세 전자·기계시스템 (MEMS) 기술이나 유·무선 네트워크 및 유비쿼터스 기술을 접목하여 대형화, 복잡화 되어가는 저농형 시스템에 융합 또는 활용하는 연구가 국내·외적으로 활발히 진행 중이며, 그 중 요즘 주목을 받고 있는 분야가 센서네트워크이다. 다시 말해서, MEMS의 기술적 발전으로 인하여 소형 센서들이 개발되고, 센서들 사이에 필요한 정보를 주고 받을 수 있는 통신기반 임베디드 시스템 및 네트워크가 개발됨에 따라 많은 활용 분야가 예상되고 있다 [3]. 예를 들어, 생산라인의 자동화에 관한 연구는 지난 20~30년 동안 꾸준히 진행되어 왔지만 [4], 중앙집중식 (centralized) 혹은 계층식 (hierarchical) 구조의 제어기 설계방법이 대부분이며, 이는 분산식 구조 방식의 많은 장점에도 불구하고 하드웨어적으로 이를 적용하는데 기술적 한계가 있었다.

본 연구에서는 센서를 포함한 임베디드 시스템과 네트워크 기술을 융합하여 복잡한 시스템에센

시네트워크를 적용하는 연구가 활발히 진행됨에 따라 이를 활용한 분산식 제어방법에 대한 이론적 접근 방법을 살펴보자 한다. 본 논문은 크게 네 가지로 구성되어 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 간단한 센서네트워크 모델의 소개, 센서네트워크를 통해 전달된 값의 정확성 및 신뢰성을 높이기 위한 추정필터 설계, 동적 표면 제어 기법을 이용한 분산식 제어기 설계가 2장에서 다루어지며, 이러한 결과를 활용하여 초정밀 방진기 설계를 하기 위한 이론적 접근방법을 3장에서 제시하는 것으로 이루어져 있다.

2. 센서네트워크 기반 분산제어

2.1 센서네트워크 모델

센서네트워크 모델의 복잡성을 여러 요소와 결부된 문제이므로 쉽게 결정되거나 않는다. 예를 들어, 지연형태 (delay pattern)은 어떠한 네트워크 프로토콜이 사용되었는지에 달려있다. Ethernet의 경우 무정령 (nondeterministic)으로서 패킷 (packet)이 전달되는데

임의의 지연시간을 가질 수 있다 [5]. 반면에 토큰링/버스(token ring/bus)와 같은 프로토콜에서는 이러한 지연이 일정한 값으로 관리화될 수 있다 [6]. 일반적으로 제어기의 복잡성을 모델의 복잡성에 비례 하므로, 제어기 설계에 있어서 센서네트워크 모델의 정확성의 해손을 최소화하여 가능한 한 간단한 모델을 제시하는 것이 이 장의 궁극적인 목적이다.

본 연구에서는 데이터 전송에 관련된 복잡한 이슈들을 고려하지 않고 페킷의 전송에 대해서 우선 집중하고자 한다. 즉, 페킷손실과 이로 인한 제어기의 안정성 및 성능지하에 관한 연구를 하기 위해서 아래와 같은 two-state Markov 모델이 사용된다 [7].

$$y_{ic}(k) = \theta(k)y_i(k) \quad (1)$$

여기서 $y_{ic}(k)$ 는 센서에서 측정된 출력값 $y_i(k)$ 이 센서네트워크를 통해서 전달된 값이며 $\theta(k)$ 는 $\Pr[\theta(k) = 0] = p$, $\Pr[\theta(k) = 1] = 1 - p$ 로 주어진 Bernoulli 프로세스이고 p 는 페킷이 손실될 확률을 나타낸다. 수식 (1)에서 주어진 네트워크 모델은 페킷이 전달될 때 ($\theta(k) = 1$)와 손실될 때 ($\theta(k) = 0$)를 각각 나타낸다.

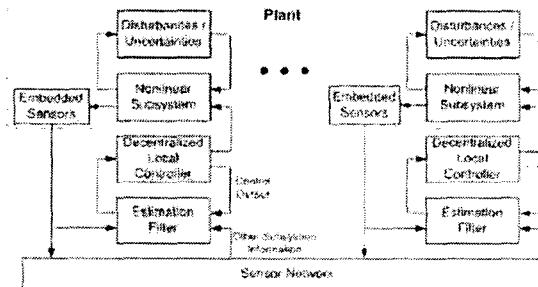


Fig. 1 Schematic of decentralized nonlinear control via sensor network

2.2 예측필터(estimate filter) 설계

N 개의 연결된 비선형 시스템은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{x}_i(k) = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}(k-1), u(k-1), (k-1)) + \mathbf{w}_i(k) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{ic} &= \begin{bmatrix} C_{\theta_1(k)} & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & C_i & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & C_{\theta_N(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_i \\ \vdots \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix} + D_{i\theta(k)} \mathbf{v}(k) \\ &= C_{i\theta(k)} \mathbf{x} + D_{i\theta(k)} \mathbf{v}(k) \end{aligned}$$

여기서 비선형 함수는 \mathbf{f}_i 는 strict-feedback 형태 [11]의 특성 함수군을 말하며 \mathbf{w}_i 는 모델의 불확실성에

해당되는 Gaussian 으로 가정한다. 게다가, 앞장에서 언급된 센서네트워크 모델이 고려된 i 번째 부분 시스템에 전달되는 관측 값(y_i)은 위에서와 같이 표현될 수 있다.

센서네트워크를 통해 전달된 값의 정확성 및 신뢰성을 높이기 위한 추정필터(estimate filter) 설계가 요구되어 이 논문에서는 확장 칼만 필터(extended Kalman filter)를 추정필터로 쓰고자 한다 [3].

Prediction:

$$\hat{\mathbf{x}}_i(k|k-1) = \mathbf{f}_i(\hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1), u(k-1), (k-1))$$

$$P(k|k-1) = \nabla \mathbf{f}_i(k) P(k-1|k-1) \nabla \mathbf{f}_i^T(k) + Q(k-1)$$

Estimation:

$$\hat{\mathbf{x}}_i(k|k) = \hat{\mathbf{x}}_i(k|k-1) + W(k) \{y_i(k) - C_{i\theta(k)} \hat{\mathbf{x}}_i(k|k-1)\}$$

$$P(k|k) = P(k|k-1) - W(k) S(k) W^T(k)$$

where

$$W(k) = P(k|k-1) C_{i\theta(k)}^T S^{-1}(k)$$

$$S(k) = C_{i\theta(k)} P(k|k-1) C_{i\theta(k)}^T + R(k)$$

The Jacobian $\nabla \mathbf{f}_i$ 은 일반적으로 상수가 아닌 state와 시간자(time-step)의 함수이다.

2.3 분산 동적 표면 제어

[8]에서 Continuous-time 도메인에서의 DDSC에 관한 안정성 및 설계에 관한 내용을 서술하였으므로 본 논문에서는 안정성에 대한 수학적 논증 없이 수식 (2)로 주어진 시스템에 대한 DDSC 를 유도하고자 한다. 우선 수식 (2)를 다시 쓴 j 번째 부분 시스템을 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x}_{i1}(k) = \mathbf{x}_{i2}(k-1) + f_{i1}(\mathbf{x}_{i1}(k-1), \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N) + w_{i1}(k)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{i2}(k) &= \mathbf{x}_{i3}(k-1) + f_{i2}(\mathbf{x}_{i1}(k-1), \mathbf{x}_{i2}(k-1), \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N) \\ &\quad + w_{i2}(k) \end{aligned}$$

$$\mathbf{x}_{im}(k) = \mathbf{x}_{i1}(k-1) + f_m(\mathbf{x}_1(k-1), \mathbf{x}_2(k-1), \dots, \mathbf{x}_N(k-1)) + w_m(k)$$

우선 j 번째 에러 표면을 다음과 같이 정의한다.

$$S_{ij}(k-1) = \mathbf{x}_{ij}(k-1) - \mathbf{x}_{ij,d}(k-1) \text{ for } 1 \leq j \leq n_i - 1$$

$i = j$ 일 때 에러 표면의 값은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S_{ii}(k) &= \mathbf{x}_{ii}(k) - \mathbf{x}_{ii,d}(k) \\ &= \mathbf{x}_{i(j+1)}(k-1) + f_{ij}(k-1) + w_{ij}(k) - \mathbf{x}_{ij,d}(k) \end{aligned}$$

$x_{ik+1} \stackrel{Q}{\rightarrow}$ 가상입력이라고 생각하면

$$\bar{x}_{i(j+1)}(k-1) = -f_{ij} + \mathbf{x}_{ij,d}(k) - \lambda_{ij} S_{ij}$$

여기서 $f_{ik} = f_{ik}(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_k, \hat{\mathbf{x}}_1, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{i-1}, \hat{\mathbf{x}}_{i+1}, \dots, \hat{\mathbf{x}}_N)$, $\hat{\mathbf{x}}_i$ 는 위에서 언급된 예측필터에 주어진 값이다. 다

을 응용 일차 로우 패스(low-pass) 필터를 다음과 같이 설계를 한다.

$$T_{i(j+1)}x_{i(j+1),d}(k) + x_{i(j+1),d}(k-1) = \tilde{x}_{i(j+1)}(k-1) \quad (3)$$

$j=n_i-1$ 까지 위의 과정을 반복한 후 최종적으로 예측값을 다음과 같이 정의한 후

$$S_{m_i}(k-1) = x_m(k-1) - x_{m,d}(k-1).$$

제어 입력 u_i 는 다음과 같이 결정된다.

$$u_i = -f_{m_i}(k-1) + x_{m,d}(k) - \lambda_{m_i} S_{m_i}(k-1)$$

여기서 수식 (3)을 이용하여

$$x_{in,d}(k) = [\tilde{x}_{m_i}(k-1) - x_{m,d}(k-1)] / \tau_{in}.$$

3. 능동형 방진기 설계

초정밀 능동형 방진기는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 반도체, LCD 생산라인 및 고정밀 측정장비 라인에서 널리 쓰이고 있다. 더 나가서 각각의 능동형 방진기는 서로 통신을 할 수 있는 센서네트워크가 구축되어 있다는 가정하에서 방진기 설계를 위한 이론적 접근을 하고자 한다.

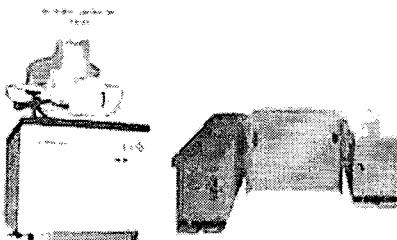


Fig. 2 A commercial active vibration isolator (Herzan USA) and its application to SEM

3.1 모델링

Fig. 3은 보이스 코일 모터를 이용한 능동형 방진기의 계략도를 보여주고 있다. 일반적으로 6 자유도의 방진을 하기 위한 방진기가 사용되고 있지만 본 논문에서는 좀 더 간결한 설명을 위해서 한 방향에 대해서만 다루고자 한다. 따라서, 방진기는 Fig. 3에서 보이는 것처럼 맹펴와 힘을 발생시키는 액츄에이터로 가정될 수 있다. 따라서, i 번째 방진기의 무분 시스템은 다음과 같이 모델링이 될 수 있다 [9].

$$\begin{aligned} x_{i1}(k) &= x_{i2}(k-1) \\ x_{i2}(k) &= -\frac{b_i}{m_i}[x_{i2}(k-1) - y_{i2}(k-1)] \\ &\quad - \frac{k_i}{m_i}[x_{i1}(k-1) - y_{i1}(k-1)] + k_i k_n u_i \\ \Rightarrow x_i(k) &= A_i x_i(k-1) + A_{i-1} y_i(k-1) + f_i \end{aligned}$$

여기서 k_i 와 k_n 은 일련 값 n 의 보이스 코일 모터에 대해서 발생되는 힘 f_i 와의 비례상수이다.

구조물에 대한 동역학적 모델은 다음과 같이 다중 자유도계 구조로 표현될 수 있다 [10].

$$y_{i1}(k) = y_{i2}(k-1)$$

$$y_{i2}(k) = -\frac{B_i}{M_i} [y_{i2}(k-1) - y_{(i-1)2}(k-1)]$$

$$-\frac{K_i}{M_i} [y_{i1}(k-1) - y_{(i-1)1}(k-1)]$$

$$\Rightarrow y_i(k) = E_i y_i(k-1) + F_{i-1} y_{(i-1)}(k-1) + w_i$$

여기서 w_i 는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 시면에서 전달되는 Disturbance f_d 를 의미한다.

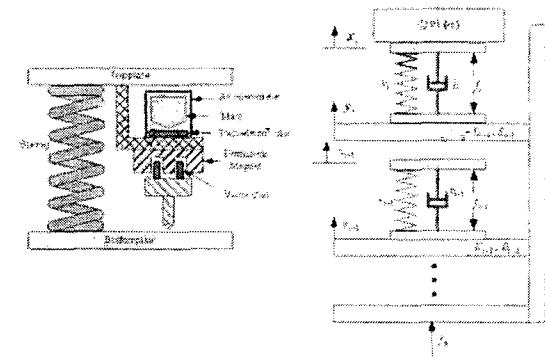


Fig. 3 Schematic of an active vibration isolator and a structure with embedded sensors and sensor network

3.2 능동 제어기 설계

예측필터를 설계하기 위해서 2.2 장의 결과를 이용할 수 있다. 다시 말해서, 구조물에 센서가 분산되어 있고 센서네트워크가 존재한다는 가정하에서 구조물의 변화를 예측하기 위해서 관측되는 값

$$y_{ie}(k-1) = \begin{bmatrix} I_{n_{i-1}} & 0 \\ 0 & I_{n_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{i-1}(k-1) \\ y_i(k-1) \end{bmatrix}$$

은 다음과 같이 표현될 수 있다. 더욱이 구조물의 모델을 비선형 모델이 아닌 선형모델로 가정하였으므로 확장 칼만 필터가 아닌 일반적으로 많이 쓰이는 칼만 필터가 쓰일 수 있다. 분산식 방진기 제어기는 2.3 장의 결과를 이용하여 쉽게 설계를 할 수가 있다.

3.3 시뮬레이션 결과

간단한 진동을 위하여 2 층으로 이루어진 구조체에 대하여 2 층에 능동형 방진기가 설치되어 있다는 가정하에 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위하여 구조물에 대한 상수는 [10]에 나와 있

는 보형 수조물에 대한 축정상수를 기반으로 하였다. 수조물에 대한 와린으로 w_i 는 uniform random 수가 사용되었다. Fig. 4는 농동형 액츄에이터가 없는 경우, 즉 스포일과 맵퍼만 있는 수동형 방진기에 대한 성능을 나타내고 있다.

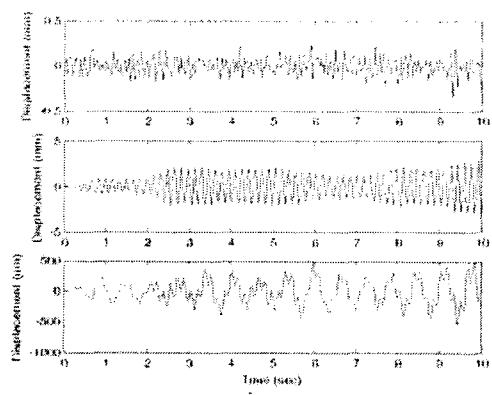


Fig. 4 Time responses of the passive vibration isolator (top: disp. of first floor, middle: disp. of second floor, bottom: disp. of top plate of the isolator)

Fig. 5는 제어기의 상수를 $\{\lambda_1, \lambda_2, \tau_2\} = \{1, 10, 0.001\}$ 로 주어졌을 때 농동형 방진기의 성능을 나타낸다. Fig. 4와 비교를 했을 때, 방진기의 상관에 전달되는 진동이 현격히 줄어들었음을 알 수 있다.

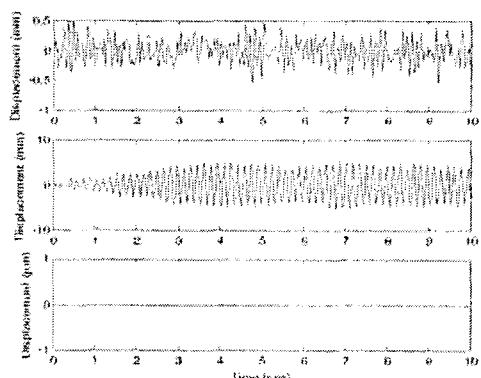


Fig. 5 Time responses of the active vibration isolator (top: disp. of first floor, middle: disp. of second floor, bottom: disp. of top plate of the isolator)

4. 결론

본 논문에서는 센서네트워크가 존재하는 시스템에 대한 분산 제어 설계에 대한 방법론을 제시하였다. 뿐만 아니라, 제시된 방법론을 조정형 방진기 설계에 응용하여 분산 제어 설계 방법의 활용 가능

성을 보여주었다. 차후 실험을 통한 실시간 검증 과정을 통하여 좀 더 실현 가능성은 보이고자 한다.

후기

본 연구는 아주대학교 산업교수 정작연과 함께에 의해서 지원되었습니다.

참고문헌

1. Song, B., Hedrick, K., and Howell, A., "Robust Stabilization and Ultimate Boundedness of Dynamic Surface Control Systems via Convex Optimization," *International Journal of Control*, Vol. 75, No. 12, pp. 870 - 881, 2002.
2. Song, B. and Hedrick, K., "Observer-based Dynamic Surface Control for a Class of Nonlinear Systems: an LMI Approach," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 49, No. 11, pp. 1995 - 2001, 2004.
3. Matsumura, A., *Decentralized Estimation and Control for Multisensor Systems*, CRC Press, 1998
4. Chu, B-T B. and Chen, S-S, *Intelligent Modeling, Diagnosis, and Control of Manufacturing Processes*. World Scientific Series in Automation – Vol. 4, World Scientific, 1992
5. Lian, F., Moyne, J.R., and Tilbury, D., "Performance Evaluation of Control Networks: Ethernet, ControlNet and DeviceNet," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 21, No. 1 pp. 66 – 83, 2001
6. Zhang, W., Bramicky, M.S., and Phillips, S.M., "Stability of Networked Control Systems," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 21, No. 1, pp. 84 – 99, 2001
7. Nguyen, G.T., Katz, R.H., and Noble, B., "A Trace-based Approach for Modeling Wireless Channel Behavior" *Proceedings of 1996 Winter Simulation Conference*, pp. 597 – 604, 1996
8. Song, B., "Decentralized Dynamic Surface Control for Large-scale Interconnected Nonlinear Systems," Submitted in *IEEE Conf. on Decision and Control*, 2005.
9. Babinski, A. and Tsao, T.-C., "Acceleration Feedback Design for Voice Coil Actuated Direct Drive" *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 3713 – 3717, 1999
10. Nishimura, H. and Kojima, A., "Robust Vibration Isolation Control for a Multi-Degree-of-Freedom Structure," *Int. Conference on Control Applications*, pp. 614 – 618, 1998