

불규칙한 시간지연이 존재하는 선형시스템의 제어기 설계

Compensator Design for Linear System with Random Delay

김 선 중, 송 택 렬*

(Sun Jung Kim and Taek Lyul Song)

Abstract : Modern control systems often use a communication network to send measurement and control signals between nodes. Communication delays can be time varying. The length of the time delays is often hard to predict and modeled as being random. This paper proposes a combined controller used to compensate network time delay by estimating the delay with the interacting multiple model (IMM). The network delay is modeled as a Markov chain and 3 modes representing heavy, medium, and low network loads are used in the IMM. The proposed method is applied to an optimal control system with double integrators and the results are compared with the existing control methods.

Keywords : random delay, combined controller

I. 서론

오늘날의 대부분의 제어시스템은 하나의 중앙 제어장치를 이용하여 시스템을 제어하던 과거와는 달리 제어기, 액츄에이터, 센서등이 네트워크로 연결된 분산 제어시스템의 구조를 가진다. 그러나 네트워크를 이용하여 데이터를 교환하기 때문에 네트워크 버스의 대역폭, 데이터를 전송할 노드수와 각 메시지의 우선순위로 인한 전송에서의 지연시간이 필수적으로 존재하게 된다. 그림 1은 단순한 형태의 분산제어시스템을 보이고 있는데 액츄에이터 노드, 센서 노드, 제어기 노드, 플랜트가 네트워크로 연결되어 있고, 네트워크를 통해서 정보를 전달하게 된다. 그리고 그림 1과 같은 단순한 형태의 분산제어시스템에서 조차 네트워크를 통해서 정보를 전달하기 때문에 정보를 담고있는 메시지가 하나의 노드에서 다른 노드로 전송될 때 센서에서 제어기 사이의 시간지연 (τ_k^{sc})과 제어기에서 계산하는데 걸리는 시간지연 (τ_k^c), 그리고 제어기에서 액츄에이터 사이의 시간지연 (τ_k^{ca})이 생기게 된다. 정보를 담고있는 메시지의 전송에서 발생하는 시간지연은 시스템의 스케줄링 방법과 네트워크 버스의 전송 상태 등에 의해서 불규칙하게 발생하고, 이러한 불규칙한 시간지연의 발생으로 인해 시스템의 성능이 저하되는 문제가 야기될 수 있다. 시스템의 성능을 저하시키는 불규칙한 시간지연은 그 형태를 예측하기가 매우 어렵기 때문에 불규칙한 시간지연을 보상하여 시스템의 성능을 높이려는 많은 연구가 수행되었다. 불규칙한 시간지연에서 가장 긴 시간지연을 기준으로 시간지연이 발생하

는 부분에 버퍼를 만들어 모든 시간지연을 가장 긴 시간지연으로서 동일화 시켜 일정한 시간지연 연을 가지게끔 만드는 방법이 [1]에서 제안되었고, 다른 방법으로는 불규칙한 시간지연을 확률적으로 모델링하여 확률적으로 정해진 시간지연의 평균값을 사용하는 방법이 [2]에서 제안되었다. 그러나 버퍼를 만들어 가장 긴 시간지연으로서 시간지연을 동일화시키는 방법은 시간지연이 필요이상으로 길어져 시스템의 성능을 저하시키고, 확률적으로 모델링한 시간지연의 평균값을 사용하여 보상하는 경우는 불규칙한 시간지연의 분산이 커지거나 확률적인 시간지연 모델이 실제와 차이가 난다면 문제가 발생하게 된다[3].

본 논문에서는 불규칙한 시간지연의 보상을 위해서 다중 모델필터 알고리즘의 하나인 IMM(Interacting Multiple Model)을 시간지연이 존재하는 시스템에 적용하였고, IMM의 적용을 위해서 네트워크 부하가 작은 경우, 네트워크 부하가 중간인 경우, 네트워크 부하가 큰 경우의 세 가지 가설을 세워서 결합제어기를 설계하였다. 또한 설계한 결합제어기의 성능을 보기 위해 여러 가지 시간지연 환경에서 시뮬레이션을 수행하였으며, 불규칙한 시간지연을 보상하기 위해 제안된 다른 제어기와 시뮬레이션결과를 비교하여 IMM을 적용한 결합제어기의 우수성을 보이도록 한다.

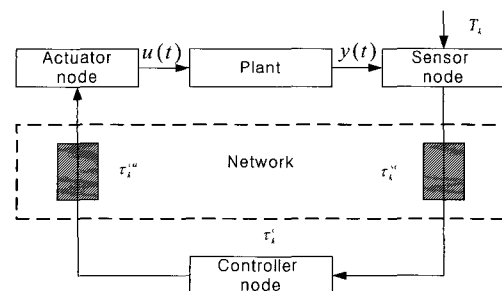


그림 1. 시간지연이 존재하는 분산 제어시스템.
Fig. 1. Distributed system with delays.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 12. 12., 채택확정 : 2004. 5. 25.

김선중 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과(sig7pp@hanmail.net)

송택렬 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부(tsong@hanyang.ac.kr)

※ 본 연구는 한국과학재단의 특정기술연구과제(과제번호 R01-2002-000-00046-0)에 의하여 지원을 받았음.

II. 시간지연과 시스템의 수학적 모델링

1. 시스템의 수학적 모델링

본 논문에서는 그림 1과 같은 구조를 갖는 시스템에 다음의 가정에 의해서 시스템을 모델링하였다. 이산시간 시스템에서 발생하는 전체 시간지연 τ_k 는 샘플링 주기 T 보다 작고 센서는 Time-driven으로 동작하며, 제어기와 액츄에이터는 Event-driven으로 동작한다. 가정에서 전체 시간지연 τ_k 는 그림 1에서 발생하는 세 종류의 시간지연 τ_k^{sc} , τ_k^c , τ_k^{ca} 의 합이고, Time-driven 센서는 정해진 샘플링 주기마다 플랜트 출력을 측정하는 센서를 의미하며 Event-driven 제어기와 액츄에이터는 센서신호와 제어신호가 제어기와 액츄에이터에 도착하는 순간 바로 제어기와 액츄에이터가 동작하는 것을 의미한다.

연속시간 시스템에서 시간지연이 발생하게 되면 시스템의 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau) \quad (1)$$

(1)에서 τ 는 연속시간에서 전체 지연시간을 나타내고 (1)의 시간지연이 존재하는 연속시간 상태방정식을 이산화 하면 그림 2와 같은 동작을 하고, 아래 식과 같이 표현할 수 있다[4].

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma_0(\tau_k)u_k + \Gamma_1(\tau_k)u_{k-1} \quad (2)$$

여기서

T : 샘플링 주기.

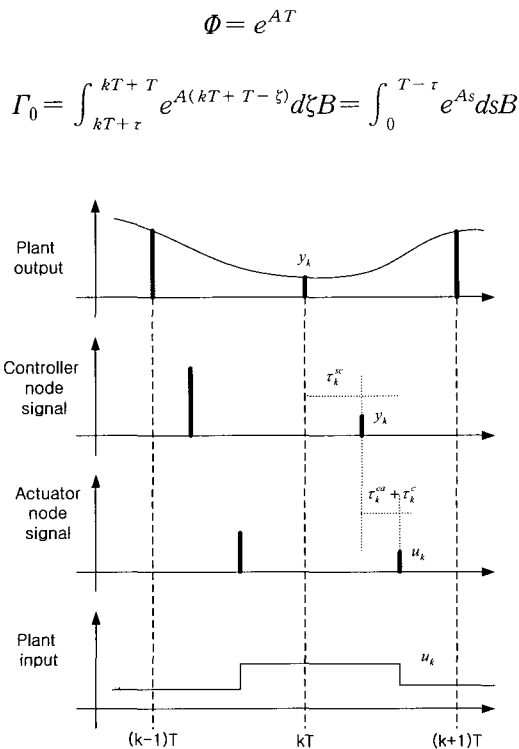


그림 2. 시간지연이 존재하는 이산시간 시스템의 신호 타이밍.
Fig. 2. Timing of signals in the discrete system with time delays.

$$\Gamma_1 = \int_{kT}^{kT+\tau} e^{A(kT+T-\xi)} d\xi B = e^{A(T-\tau)} \int_0^\tau e^{As} ds B$$

그림 2와 (2)에서 볼 수 있듯이 시간지연이 존재하는 시스템에서 시간지연의 발생으로 인해서 k 번째 플랜트 입력으로 $T - \tau_k$ 동안 u_k 가 가해지고 전체지연시간 τ_k 만큼 u_{k-1} 이 플랜트 입력으로 가해지게 된다.

2. 시간지연의 수학적 모델링

실제 분산제어시스템에서 시간지연을 유발시키는 요인중의 하나는 시스템의 각 노드들을 연결하고 있는 네트워크의 부하(load)이다. 시간지연의 발생원인중 하나인 네트워크 부하의 상태변화로써 불규칙한 시간지연을 모델링한 Markov chain 시간지연 모델이 실제 시간지연과 가장 유사하다고 볼 수 있다[5]. 본 논문에서는 그림 3과 같이 Markov chain으로 관계를 맺고있는 네트워크 부하의 상태모델과 네트워크 부하의 상태에 따른 전체 시간지연의 분포를 그림 4와 같이 모델링 하였다. 그림 3에서 Markov chain으로 관계를 맺고있는 세가지 네트워크 부하의 상태는 낮은 네트워크 부하(low network load : L),중간의 네트워크 부하(medium network load : M), 높은 네트워크 부하(high network load : H)이고, 각각의 네트워크 부하의 상태에 따른 전체 시간지연은 가우시안분포를 하고 네트워크 부하의 상태에 따라서 발생하는 시간지연은 상관관계가 전혀없이 독립적이라 가정하였다. 또한 네트워크 부하의 상태에 따른 시간지연은 빠르게 변화할 수 있지만 Markov chain으로 관계를 맺고있는 네트워크 부하의상태는 천천히 변화한다고 가정하였다.

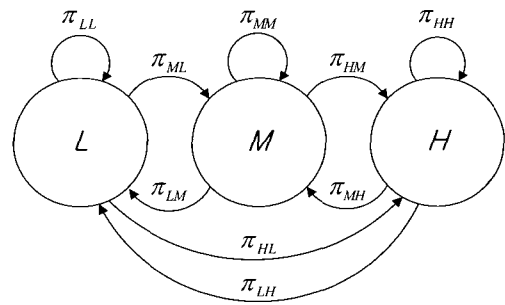


그림 3. Markov chain으로 모델링된 네트워크 상태.
Fig. 3. Markov chain Modeling of the state in a network.

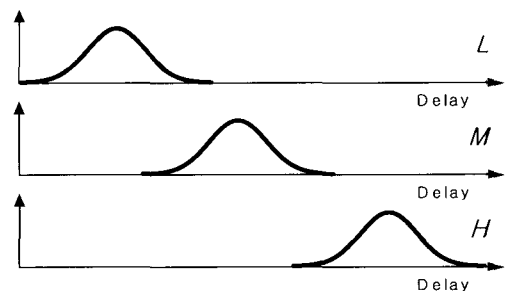


그림 4. Markov chain으로 모델링된 네트워크 상태에 따른 확률적 분포.
Fig. 4. The delay distribution corresponding to the state of the Markov chain in a network.

III. 평균값제어기

[2]에서는 불규칙한 시간지연을 보상하기 위해서 수학적으로 모델링된 시간지연의 평균값을 사용하여 제어입력을 계산하고 평균값으로는 샘플링 주기의 절반이 되는 값을 사용한다. 시간지연이 존재하는 이산시간 시스템의 평균값제어기는 주어진 비용함수를 최소화시키는 제어입력을 구함으로써 설계할 수 있고, 평균값제어입력을 구하기 위한 비용함수는 아래와 같다.

$$J_N = x_N^T Q_N x_N + E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix} \right\} \quad (3)$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_{12} \\ Q_{12}^T & Q_2 \end{bmatrix}$$

Q : symmetric, positive-semidefinite

Q_2 : positive-definite

주어진 비용함수 (J_N)를 최소화하는 제어입력, 즉 평균값 제어입력은 다음과 같다.

$$u_k^* = -L(\tau_k^{sc}) \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1}^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= -L_x(\tau_k^{sc})x_k - L_u(\tau_k^{sc})u_{k-1}^*$$

그리고

$$L(\tau_k^{sc}) = (Q_{22} + \mathcal{S}_{k+1}^{22})^{-1} [Q_{12}^T + \mathcal{S}_{k+1}^{21} \quad \mathcal{S}_{k+1}^{23}]$$

$$L_x(\tau_k^{sc}) = (Q_{22} + \mathcal{S}_{k+1}^{22})^{-1} (Q_{12}^T + \mathcal{S}_{k+1}^{21})$$

$$L_u(\tau_k^{sc}) = (Q_{22} + \mathcal{S}_{k+1}^{22})^{-1} \mathcal{S}_{k+1}^{23}$$

$$\mathcal{S}_{k+1}(\tau_k^{sc}) = \frac{E}{\tau_k^{ca}} \{ G^T(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) S_{k+1} G(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) | \tau_k^{sc} \}$$

$$G(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_0(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) & \Gamma_1(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_k = \frac{E}{\tau_k^{sc}} \{ F_1^T(\tau_k^{sc}, S_{k+1}) Q F_1(\tau_k^{sc}, S_{k+1}) + F_2^T(\tau_k^{sc}, S_{k+1}) \mathcal{S}_{k+1}(\tau_k^{sc}) F_2(\tau_k^{sc}, S_{k+1}) \}$$

$$F_1(\tau_k^{sc}) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -L_x(\tau_k^{sc}) & -L_u(\tau_k^{sc}) \end{bmatrix}$$

$$F_2(\tau_k^{sc}) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -L_x(\tau_k^{sc}) & -L_u(\tau_k^{sc}) \\ 0 & I \end{bmatrix}$$

$$S_N = \begin{bmatrix} Q_N & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

여기서 \mathcal{S}_{k+1}^{ij} 는 \mathcal{S}_k 행렬의 i 번째 행 블록 j 번째 열 블록을 나타내고 Q_{ij} 는 Q 행렬의 i 번째 행 블록 j 번째 열 블록을 나타낸다.

IV. 결합제어기

본 논문에서는 시간지연이 존재하는 이산시간 시스템에서 불규칙한 시간지연으로 인한 시스템의 성능저하를 보완하기 위해 [6]에서 소개된 다중모델 추정기법중의 하나인 IMM(Interacting Multiple Model)을 사용한 결합제어기를 제안하고자 한다. 많은 다중모델 추정알고리즘이 있지만 다중모델 추정알고리즘 중에서 IMM은 계산량이 적으면서도 성능이 좋은 알고리즘으로 알려져 있다. IMM알고리즘을 블록 다이어그램으로 나타내면 아래 그림 5과 같이 다중의 추정 필터로서 칼만필터를 사용하여 원하는 값을 구하게된다. 본 논문에서 결합제어기를 설계하기 위해 사용되는 이산시간 시스템의 상태방정식과 측정방정식은 다음과 같다.

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma_0(\tau_k)u_k + \Gamma_1(\tau_k)u_{k-1} \quad (5)$$

$$z_{k+1} = Cx_{k+1} + w_{k+1}$$

$$C = [1 \ 0], \quad w_{k+1} \sim N(0, R) \quad (6)$$

(6)에서 w_{k+1} 는 평균이 0이고, 공분산이 R 인 백색가우시안 노이즈 벡터이다. 시간지연이 존재하는 시스템에서 시간지연을 보상하기 위해 IMM을 적용한 결합제어기를 설계하기 위해서는 각 추정필터들을 구분짓는 가설들이 필요하다. 본 논문에서는 각 추정필터를 구분짓는 가설들로서 그림 3과 같은 Markov chain으로 관계를 맺고 있는 3종류의 네트워크 부하의 상태를 선택하였다. 가설 H^1 은 네트워크 부하가 가장 작은 경우이고, 네트워크 부하가 가장 작은 경우의 시간지연상태는 평균이 τ^1 인 가우시안 분포를 한다고 정하였다. 그리고 가설 H^2 는 네트워크 부하가 중간인 경우이고, 네트워크 부하가 중간인 경우의 시간지연상태는 평균이 τ^2 인 가우시안 분포를 한다고 정하였으며, 가설 H^3 는 네트워크 부하가 가장 큰 경우이고, 네트워크 부하가 가장 큰 경우의 시간지연상태는 평균이 τ^3 인 가우시안

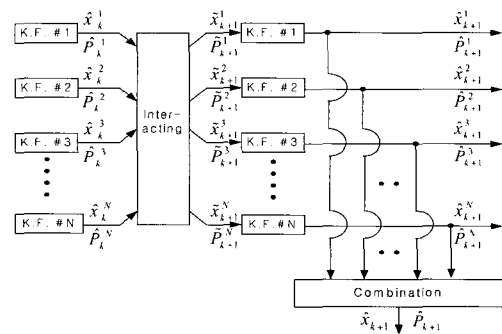


그림 5. IMM알고리즘의 블록다이어그램.
Fig. 5. Block diagram of IMM.

분포를 한다고 정하였다. 위와 같이 정해진 가설에 따라서, 네트워크 부하에 따른 시간지연의 상태에 따라서 다르게 모델링된 추정필터에서 $t = k$ 시간 때의 각 가설에 의해 update 된 상태변수는 $\hat{x}_k^1, \hat{x}_k^2, \hat{x}_k^3$ 이고 공분산은 P_k^1, P_k^2, P_k^3 라 하면 시간 $t = k+1$ 일 때 interacting되어진 상태 변수와 공분산은 다음과 같다.

« interacting 과정 »

$$\tilde{x}_{k+1}^i = \frac{\sum_{j=1}^3 \hat{x}_k^j \Pi_{ij} \Pr(H^j | Z_k)}{\sum_{j=1}^3 \Pi_{ij} \Pr(H^j | Z_k)}, \{ i=1,2,3 \} \quad (7)$$

$$P_{k+1}^i = \frac{\sum_{j=1}^3 (P_k^j + \hat{x}_{k+1}^i \hat{x}_{k+1}^{jT}) \Pi_{ij} \Pr(H^j | Z_k)}{\sum_{j=1}^3 \Pi_{ij} \Pr(H^j | Z_k)} - \tilde{x}_{k+1}^i \tilde{x}_{k+1}^{iT} \quad (8)$$

(7)와 (8)에서 Π_{ij} 는 네트워크 부하의 상태, 다시 말해서 시간지연 상태가 j 상태에서 i 상태로 천이될 확률을 나타내는 상태천이행렬이고 Z_k 는 시간 $t = k$ 까지의 측정치들의 집합으로서 $Z_k = \{z_k, z_{k-1}, \dots, z_0\}$ 를 나타낸다. (7)과 (8)에서 $\tilde{x}_{k+1}^i, P_{k+1}^i$ 는 $t = k$ 에서 $t = k+1$ 로 시간이 변할 때 네트워크 부하의 상태, 즉 시간지연 상태가 어떻게 변할 것인지 확률적으로 계산하여 구해진 각 추정 필터들의 초기값이다. interacting으로 \tilde{x}_{k+1}^i 와 P_{k+1}^i 가 구해지면 prediction 과정에서 시스템 상태의 예측치와 와 공분산의 예측치인 \bar{x}_{k+1}^i 와 \bar{P}_{k+1}^i 를 다음 식으로서 구할 수 있다.

« prediction 과정 »

$$\bar{x}_{k+1}^i = \Phi \tilde{x}_{k+1}^i + \Gamma_0(\tau_k^i) u_k^* + \Gamma_1(\tau_k^i) u_{k-1}^* \quad (9)$$

$$\bar{P}_{k+1}^i = \Phi P_{k+1}^i \Phi \quad (10)$$

(9)에서 τ_k^i 는 i 번째 가설인 H^i 와 짝지어진 네트워크 부하에 따른 시간지연 상태의 평균값이다. 예를 들어 네트워크 부하가 가장 작은 경우가 가설 H^1 과 짝지어 있다면 τ^1 은 가장 작은 시간지연 상태의 평균값이 됨을 의미한다. 그리고 u_k^* 와 u_{k-1}^* 는 시간 $t = k$ 일 때 와 시간 $t = k-1$ 일 때 구해진 결합제어입력값이다. (9)와 (10)의 prediction단계에서 미리 정해놓은 각 가설에 따른 네트워크 부하와 연관된 시간지연 상태의 평균값으로 인해 각 추정 필터의 prediction마다 $\Gamma_0(\tau_k^i)$ 와 $\Gamma_1(\tau_k^i)$ 가 달라지게 되고, $\Gamma_0(\tau_k^i)$ 와 $\Gamma_1(\tau_k^i)$ 에 의해서 시간지연을 고려하여 시스템의 상태를 예측하게 된다. prediction과정이 끝나

게 되면 플랜트출력을 정해진 샘플링 주기마다 센서가 측정하여 측정치방정식에 의해 실제 측정치 z_{k+1} 을 얻게 되고, 측정치 z_{k+1} 과 각 가설에 따라서 다르게 설계된 추정 필터들의 예측값과 비교하여 각 가설 $H_{k+1}^1, H_{k+1}^2, H_{k+1}^3$ 가 맞을 확률, 즉 미래에 발생할 시간지연 상태가 어떤 상태인지 (11)에서 확률적으로 구하게 된다. 시간지연이 존재하는 실제 시스템에서 측정된 실제 측정치와 각 가설에 의해 설계된 추정필터의 예측값과 비교하여 구해진 모드확률은 측정치에 가까운 예측값을 구해낸 필터의 가설이 맞을 확률인 모드확률이 다른 필터의 모드확률보다 크게 나타나게 됨으로 인해서 미래의 시간지연을 예측하는 것이다. 본 논문에서 제안하는 결합제어기는 엄밀히 따지면 한 샘플링 주기 전의 시간지연을 추정하는 것인데 시간지연의 발생원인중 하나인 네트워크 부하의 변화가 느리다는 가정으로 인해서 네트워크 부하와 관련된 시간지연 상태의 변화도 느려질 것이기 때문에 한 샘플링 주기 전과 후의 시간지연 변화가 크지 않을 것임으로 결합제어기는 미래에 발생할 시간지연을 예측하고 고려하여 제어입력을 계산하는 것으로 볼 수 있다.

« 모드확률 계산과정 »

$$\Pr(H_{k+1}^i | Z_{k+1}) = \frac{f(z_{k+1} | H_{k+1}^i, Z_k)}{\sum_{j=1}^3 f(z_{k+1} | H_{k+1}^j, Z_k)} \times \frac{\sum_{j=1}^3 \Pi_{ij} \Pr(H^j | Z_k)}{\sum_{m=1}^3 \Pi_{im} \Pr(H^m | Z_k)} \quad (11)$$

각 가설이 맞을 확률인 모드확률이 구해지면 update 과정을 수행함으로써 각 가설에 따라 다르게 모델링된 각 각의 추정필터에서 최종의 상태변수 및 공분산 그리고 제어 입력을 얻게 된다.

« update 과정 »

$$\hat{x}_{k+1}^i = \bar{x}_{k+1}^i + K_{k+1}^i (z_{k+1} - C \bar{x}_{k+1}^i) \quad (12)$$

$$P_{k+1}^i = (I - K_{k+1}^i C) \bar{P}_{k+1}^i (I - K_{k+1}^i C)^T + K_{k+1}^i R_{k+1} K_{k+1}^{iT} \quad (13)$$

$$K_{k+1}^i = \bar{P}_{k+1}^i C^T (C \bar{P}_{k+1}^i C^T + R_{k+1})^{-1} \quad (14)$$

$$u_{k+1}^i = -L(\tau_k^i) \begin{bmatrix} \hat{x}_{k+1}^i \\ u_k^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$J_N^i = x_N^{iT} Q_N x_N^i + \frac{E}{\tau^i} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \begin{bmatrix} x_k^i \\ u_k^i \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} x_k^i \\ u_k^i \end{bmatrix} \right\} \quad (16)$$

(15)에서 $L(\tau_k^i)$ 는 i 번째 가설 H_{k+1}^i 와 짝지어진 네트

워크 부하와 연관된 시간지연 상태의 평균인 τ_k^i 을 사용하여 얻은 제어입력 이득이다. 평균값제어기에서는 샘플링 주기의 절반이 되는 값을 평균값으로 하여 (3)을 최소화하는 평균값제어이득 $L(\tau_k^c)$ 를 계산하였고, 결합제어기에서도 평균값제어기와 비슷하게 각 가설에 따른 네트워크 부하와 연관된 시간지연 상태의 평균값을 사용하여 (16)을 최소화하는 제어입력을 계산한다. 마지막으로 combination과정에서는 각 가설에 따라 설계된 추정필터들의 결과 값들과 모드확률을 조합하여 시스템의 최종상태변수의 추정치와 공분산을 구하게 된다.

« combination 과정 »

$$\hat{x}_{k+1} = \sum_{i=1}^N \hat{x}_{k+1}^i \Pr(H_{k+1}^i | Z_{k+1}) \quad (17)$$

$$P_{k+1} = \sum_{i=1}^N \{ (P_{k+1}^i + (\hat{x}_{k+1}^i - \hat{x}_k)(\hat{x}_{k+1}^i - \hat{x}_k)^T) \times \Pr(H_{k+1}^i | Z_{k+1}) \} \quad (18)$$

또한 combination과정에서는 각각의 가설 하에서 구해진 제어입력값들 ($u_{k+1}^1, u_{k+1}^2, u_{k+1}^3$)과 각 가설이 맞을 확률인 모드확률을 조합하여 본 논문에서 제안하고자 하는 결합제어 입력값을 얻게된다.

« 결합제어입력 »

$$u_{k+1}^* = \sum_{i=0}^3 \Pr(H_{k+1}^i | Z_{k+1}) u_{k+1}^i \quad (19)$$

V. 시뮬레이션

본 논문에서는 시간지연이 존재하는 이산시간 시스템에서 IMM을 적용한 결합제어기의 성능을 알아보기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션환경은 시간지연이 일정하게 발생하는 환경에서와 시간지연이 불규칙하게 발생하는 환경으로 나누어 시뮬레이션을 수행하였고, 시뮬레이션 환경에 따라 시간지연을 보상하지 않은 시스템과 [2]에서 제안한 평균값제어기를 사용한 시스템과 IMM을 적용한 결합제어기를 사용한 시스템의 비용과 플랜트 출력 및 제어입력을 비교하였다. 시뮬레이션에 사용된 연속시간 시스템 방정식은 다음과 같다,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$y = [1 \ 0] x$$

샘플링 주기는 0.15초, 시스템의 초기상태는 $x_0 = [1 \ 0]^T$, 초기입력은 $u_0 = 5$, 그리고 Markov chain으로 모델링된 네트워크 상태의 상태전이확률은 아래와 같다.

$$\Pi_{ij} = \begin{bmatrix} 0.85 & 0.1 & 0.05 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 \\ 0.05 & 0.1 & 0.85 \end{bmatrix}$$

네트워크 상태의 상태전이확률 Π_{ij} 는 j 상태에서 i 상태로 상태가 천이 될 확률이다. 시스템모델에서 측정치 잡음을 넣지 않은 것은 [2]에서 제안한 평균값제어기를 설계할 때 측정치잡음은 고려하지 않고 설계하였기 때문에 결합제어기와의 비교를 위해서 측정치잡음은 시스템모델에서 제외하였다. 결합제어기를 설계하기 위해 IMM에 사용한 가설은 세 종류로서 가설 H^1 은 낮은 네트워크 부하에서 시간지연은 평균 (τ_k^1)이 0.025이고 분산이 0.01²인 가우시안 분포를 한다는 가설이고, 가설 H^2 는 중간 네트워크 부하에서 시간지연은 평균(τ_k^2)이 0.075이고 분산이 0.01²인 가우시안 분포를 한다는 설이고, H^3 는 높은 네트워크 부하에서 시간지연은 평균(τ_k^3)이 0.125이고 분산이 0.01²인 가우시안 분포를 한다는 가설 하에서 결합제어기를 설계하였다.

그림 6에서는 실제 시간지연을 0에서부터 샘플링 주기 0.15초까지 일정하게 변화시키면서 시간지연의 변화에 따른 각 제어기들의 비용을 나타낸 것이다. 그림 6에서도 볼 수 있듯이 0.075의 시간지연이 발생하면 [2]의 평균값제어기와 본 논문에서 제안하는 결합제어기가 비슷한 성능을 보이지만 시간지연이 커질수록 시간지연을 보상하지 않은 시스템의 비용은 아주 커지고, [2]의 평균값제어기보다 결합제어기의 비용이 더 작게 나오는 것을 볼 수 있다.

그림 8에서 그림 13까지는 그림 7과 같은 불규칙한 시간지연이 발생하는 환경에서 각 제어기들의 플랜트 출력과 제어입력을 나타내었다.

간지연을 보상하지 않은 시스템의 플랜트 출력이 정상상태까지 도달하는데 걸리는 시간이 길고 심한 출렁임이 발생하는 것을 그림 8에서 볼 수 있다. 또한 그림 9에서는 시간지연을 보상하지 않은 시스템의 제어입력이 크게 진동하고 많은 제어입력이 소모되는 것을 보여준다.

[2]에서 제안한 평균값제어기는 그림 7과 같은 불규칙한 시간지연이 발생하는 환경에서도 시간지연을 보상하지 않은 그림 7과 같은 불규칙한 시간지연이 존재하는 환경에서 시 시스템의 플랜트 출력과 제어입력보다 안정된 플랜트 출력과 제어입력을 만들어내지만 시스템이 정상상태까지 도달하는데 시간이 걸리고 심하지는 않지만 출렁이는 것을 그림 10과 그림 11에서 볼 수 있다. IMM적용한 결합제어기를 사용한 시스템은 그림 7과 같은 불규칙한 시간지연이 발생하는 환경에서도 다른 제어기보다 안정되고 정상상태 응답이 빠른 플랜트 출력과 다른 제어기들과는 확연히 비교될 만큼 작은 제어입력을 보여줄 뿐만 아니라 [2]에서 제안한 평균값제어기보다 불규칙한 시간지연 환경에서 성능이 뛰어난 것을 그림 12와 그림 13에서 볼 수 있다. 그림 14에서 채선(dashed-dot line)은 시간지연이 작은 경우 모드확률이고 점선(dashed-line)은 시간지연이 중간인 경우의 모드확률이며 실선(solid-line)은 시간지연이 큰 경우의 모드확률을 나타내고 있는데 결합제어기가 제대로 시간지연을 추정하고 있는지 보여주고 있다. 시뮬레이션상의 실제 시간지연을 나타내는 그림 7의 불규칙한 시간지연에서 초기에 높은 시간지연이 발생함을 볼 수 있고, 그에 따라서 그림 14에서 시간

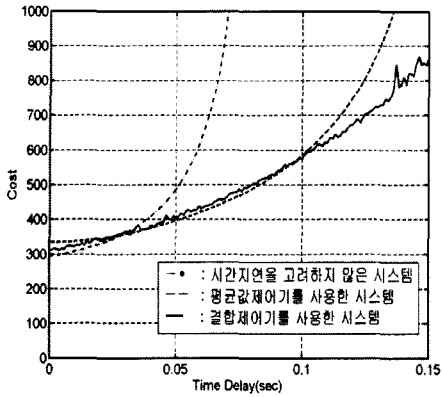


그림 6. 시간지연에 따른 각 제어기의 비용.
Fig. 6. Cost of the each controllers.

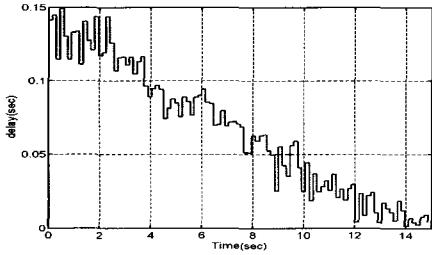


그림 7. 불규칙한 시간지연.
Fig. 7. Random delay history.

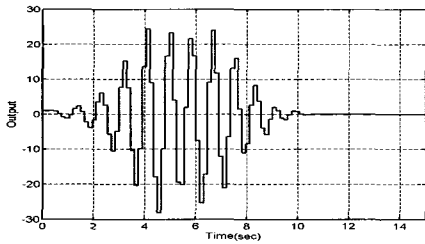


그림 8. 지연시간을 보상하지 않은 시스템의 플랜트 출력.
Fig. 8. Plant output using the uncompensated controller.

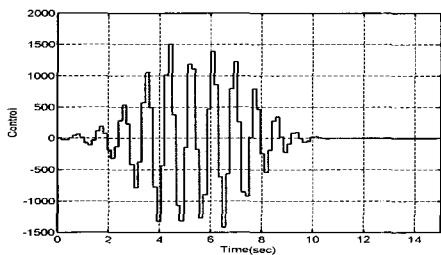


그림 9. 지연시간을 보상하지 않은 시스템의 제어입력.
Fig. 9. Control input using the uncompensated controller.

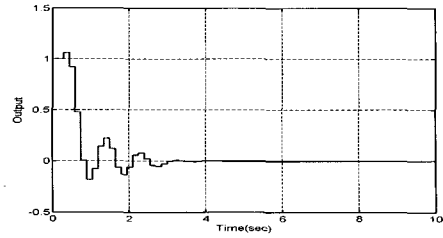


그림 10. [2]의 평균값제어기를 사용한 시스템의 플랜트 출력.
Fig. 10. Plant output using the mean-time controller of [2].

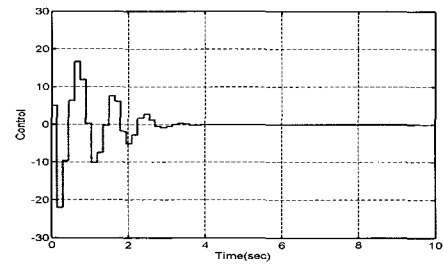


그림 11. [2]의 평균값제어기를 사용한 시스템의 제어입력.
Fig. 11. Control input using the mean-time controller of [2].

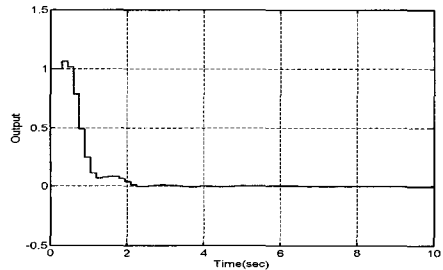


그림 12. 결합제어기를 사용한 시스템의 플랜트 출력.
Fig. 12. Plant output using the combined controller.

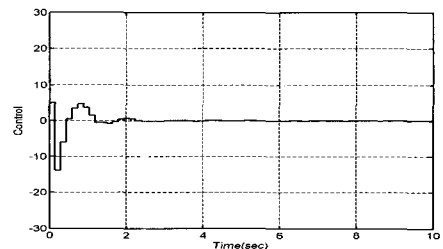


그림 13. 결합제어기를 사용한 시스템의 제어입력.
Fig. 13. Control input using the combined controller.

지연이 높은 경우의 모드확률이 다른 모드확률보다 크게 나타나는 것으로 보아 결합제어기의 성능이 평균값제어기보다 좋은 것은 결합제어기에서 시간지연을 잘 추정하기 때문으로 볼 수 있다.

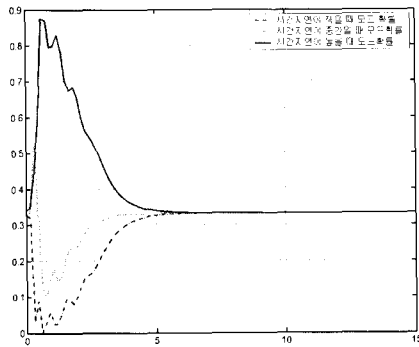


그림 14. 결합제어기의 모드확률.

Fig. 14. Mode probability of the combined controller.

VI. 결론

본 논문에서는 여러 가지 시간지연환경에서 시뮬레이션을 수행하여 시간지연이 발생하는 시스템에서 시간지연을 보상하지 않으면 시간지연이 높아질수록 시스템의 플랜트 출력과 제어입력이 불안정해지는 것을 확인하였고, 평균값 제어기는 시간지연이 정해진 평균값보다 높아질수록 시스템의 플랜트 출력이나 제어입력이 나빠지는 것을 볼 수 있었다. 그러나 본 논문에서 제안하는 IMM을 적용한 결합제어기는 어떠한 시간지연환경에서도 안정되고 빠른 플랜트 출력과 적은 제어입력을 보임으로서 이미 제안된 평균값제어기보다 시간지연을 보상함에 있어서 뛰어난 성능을 보여주었다. 현대 과학의 빠른 발전으로 인해 제어시스템이 더욱

복잡해 질 것을 예상한다면 시간지연의 발생은 필수적이기 때문에 제어시스템에서 발생하는 시간지연을 보상하기 위한 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- [1] R. Luck and A. Ray, "An Observer-based Compensator for Distributed Delays", *Automatica*, 26:5, pp. 903-908, 1990.
- [2] J. Nilsson, B. Bernhardsson, B. Wittenmark, "Stochastic Analysis and Control of Real-Time Systems with Rand Delays", *Proceedings of the 13th International Federation of Automatic Control World Congress*, San Francisco, pages 267-272, 1996.
- [3] J. Nilsson, "Analysis and Design of Real-Time System with Random Delays", Lic Tech thesis, *Department of Automatic Control*, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden., 1996.
- [4] K. J. Astrom, B. Wittenmark, *Computer Controlled Systems-Theory and Design -second edition*, Prentice-Hall, 1990.
- [5] J. Nilsson, B. Bernhardsson, "Analysis of Real-Time Control Systems with Time Delays", *Proceedings of the 35th Conference in Decision and Control Kobe*, Japan, 1996.
- [6] H. Blom, Y. Bar-Shalom, "The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficient", *IEEE Trans. on Automatic Control*, AC-33, pp780-783, 1988.



김 선 중
 2002년 한양대학교 전자컴퓨터 공학부 졸업. 동 대학원 석사(2004). 2004년~2004년 한양대학교 전자전기제어계측 공학과 석사 졸업.



송 택 렬
 1974년 서울대학교 공학사. 1981년 Univ. of Texas at Austin 항공우주공학과 석사. 1983년 Univ. of Texas at Austin 항공우주공학과 박사. 1974년~1995년 국방과학연구소. 1995년~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 유도제어, 표적상태추정 등.