

# 임의의 네트워크 지연을 갖는 선형 다개체시스템의 일치 Consensus of Linear Multi-Agent Systems with an Arbitrary Network Delay

이 성 렬 \*\*

Sungryul Lee \*\*

## Abstract

This paper investigates the consensus problem for linear multi-agent systems with an arbitrary network delay. The sufficient conditions for a state consensus of linear multi-agent systems are provided by using linear matrix inequalities. Moreover, it is shown that under the proposed protocol, the consensus can be achieved even in the presence of an arbitrarily large network delay. Finally, an illustrative example is given in order to show the effectiveness of our design method.

## 요 약

본 논문은 임의의 네트워크 시간 지연이 존재하는 선형 다개체 시스템의 일치문제를 다룬다. 다개체 시스템의 상태일치를 위한 충분조건은 선형행렬방정식을 이용하여 제공된다. 또한, 제안한 충분조건아래에서 임의의 크기를 갖는 네트워크 지연이 존재하는 경우에도 일치에 도달할 수 있음을 증명한다. 마지막으로 제안한 결과의 유효성을 증명하기 위하여 수치 예제를 제공한다.

*Key words : multi-agent systems, consensus, network delay, Lyapunov-Krasovskii, linear matrix inequality.*

## 1. 서론

최근에 다개체 시스템의 일치 문제가 많은 주목을 받고 있다. 그것은 무인항공기의 협조제어, 이동로봇의 대형제어, 인공위성의 자세정렬, 등 다양한 분야에 응용이 가능하기 때문이다. 지금까지 동종 및 이종의 선형 다개체 시스템의 일치문제는 광범위하게 연구되어져 왔다[1,2,3,4]. 또한, 강인 일치, 출력피드백 일

치, 동적네트워크인 경우의 일치, 비선형시스템의 일치 등이 활발히 연구되고 있다[5,6,7]. 한편, 각 개체들은 시간지연이 존재하는 통신 네트워크를 통하여 이웃한 개체들의 상태정보를 받기 때문에 네트워크 지연을 갖는 다개체 시스템의 일치 문제가 매우 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 시간지연을 갖는 다개체 시스템의 일치 문제에 관한 많은 논문들은 먼저, 좌표변환을 이용하여 일치 문제를 안정화 문제로 변환하고 기존의 시간지연시스템의 안정화 문제를 해결하는데 사용한 제어기법을 이용하여 일치 문제를 해결하였다[8,9,10,11]. 그러나, 이런 종류의 연구들은 매우 큰 통신 지연이 존재하는 다개체 시스템에는 적용하기가 힘들다. 왜냐하면, 일치를 보장하는 충분조건들이 매우 큰 시간지연이 존재하는 경우에는 만족하

\*\*Dept. of Control and Robotics Engineering,  
Kunsan National University  
Tel: 063-469-4687, Email : 2sungryul@kunsan.ac.kr

Manuscript received Oct. 28, 2014; revised Nov. 29,  
2014 ; accepted Dec.3. 2014

지 않기 때문이다. 본 논문에서는 통신 지연을 갖는 네트워크로 연결된 체인형 적분기 시스템의 일치 문제를 다룬다. 기존의 논문과는 다르게 저이득 피드백 제어를 이용하여  $0 < \Delta < \infty$ 을 만족시키는 모든 시간지연  $\Delta$ 가 존재하는 경우에도 일치 문제를 해결할 수 있음을 증명한다. 마지막으로 수치예제를 통하여 제안한 방법을 입증한다.

## II. 문제정의

본 논문에서는 다음과 같은 다개체 시스템을 고려한다.

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bu_i(t), i = 1, \dots, N \quad (1)$$

여기서  $x_i(t) \in R^n, u_i(t) \in R$ 는 각각  $i$ 번째 개체의 상태변수, 제어입력을 나타낸다. 행렬  $A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times 1}$ 는 다음과 같은 상수행렬이다.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

다개체 시스템 (1)의 통신 네트워크는 방향(Directed) 그래프  $G = (V, E)$ 를 이용하여 모델링한다.  $V = \{1, \dots, N\}$ 는 노드의 집합이고  $E \subset V \times V$ 는 에지의 집합이다. 각 개체는 그래프  $G$ 의 각노드로 정의되고 에지  $(i, j) \in E$ 는 개체  $j$ 가 개체  $i$ 로부터 상태정보를 받을 수 있음을 의미한다. 방향 그래프  $G$ 의 인접(Adjacency) 행렬  $A = (a_{ij}) \in R^{N \times N}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} a_{ij} &= 0 \text{ if } i = j, \\ a_{ij} &> 0 \text{ if } (i, j) \in E, \\ a_{ij} &= 0 \text{ if } (i, j) \notin E. \end{aligned} \quad (3)$$

또한, 방향그래프  $G$ 의 라플라시안(Laplacian) 행렬  $L = (l_{ij}) \in R^{N \times N}$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} l_{ij} &= \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij} \text{ if } i = j, \\ l_{ij} &= -a_{ij} \text{ if } i \neq j. \end{aligned} \quad (4)$$

식(1)과 같은 다개체 시스템에 대하여 다음과 같이 일치문제를 정의한다.

**정의1:** 다개체 시스템 (1)에 대하여 다음 식 (5)를 만족할 때 식 (1)의 모든 상태가 일치에 도달한다고 정의한다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = 0 \text{ for } i, j = 1, \dots, N \quad (5)$$

$0 < \Delta < \infty$ 를 만족시키는 네트워크 지연이 존재하는 환경 하에서 다개체 시스템 (1)에 대한 일치 문제를 풀기 위하여 다음과 같은 일치 제어기를 제안한다.

$$u_i(t) = K_\theta \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_i(t - \Delta) - x_j(t - \Delta)), i = 1, \dots, N \quad (6)$$

식 (5)에서  $K_\theta = (k_1/\theta^n, \dots, k_n/\theta)$ 는 이득행렬이고 저이득 파라미터  $\theta > 0$ 는 통신지연을 보상하는 역할을 수행한다. 상수  $\Delta > 0$ 는 다개체 시스템의 네트워크에 존재하는 통신지연을 나타낸다. 본 논문의 목표는  $0 < \Delta < \infty$ 를 만족시키는 모든 통신지연  $\Delta$ 에 대하여 제어기 (5)가 식 (1)의 일치문제를 해결할 수 있음을 보인다.

## III. 주요 결과

다음 정리에서 본 논문의 주요결과를 제시한다.

**정리1:** 다음 선형행렬부동식 (6)을 만족시키는 행렬  $P = P^T > 0, Y$ 와 상수  $\mu > 0$ 가 존재한다면  $0 < \Delta < \infty$ 를 만족시키는 모든 통신지연  $\Delta$ 에 대하여 다개체 시스템 (1)의 일치문제를 해결하는 이득행렬  $K = (k_1, \dots, k_n)$ 와 파라미터  $\theta > 0$ 가 항상 존재한다. 또한,  $K = YP^{-1}$ 이다.

$$\begin{aligned} & (I_{N-1} \otimes (PA^T + AP) + \bar{L} \otimes (BY) + \bar{L}^T \otimes (BY)^T) \\ & \leq -\mu (I_{N-1} \otimes I_n) \end{aligned} \quad (7)$$

위 식에서 행렬  $I_x \in R^{x \times x}$ 는 단위행렬을 나타내고 행렬  $\bar{L} \in R^{(N-1) \times (N-1)}$ 는 다음과 같다.

$$\bar{L} = \begin{pmatrix} l_{11} - l_{N1} & l_{12} - l_{N2} & \dots & l_{1(N-1)} - l_{N(N-1)} \\ l_{21} - l_{N1} & l_{22} - l_{N2} & \dots & l_{2(N-1)} - l_{N(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{(N-1)1} - l_{N1} & l_{(N-1)2} - l_{N2} & \dots & l_{(N-1)(N-1)} - l_{N(N-1)} \end{pmatrix} \quad (8)$$

**증명:** 먼저 식 (1), (4), (5)를 고려하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + BK_\theta \sum_{j=1}^N l_{ij} x_j(t - \Delta) \quad (9)$$

여기서 다음과 같은 좌표변환을 고려해보자.

$$e_i(t) = x_i(t) - x_N(t), i = 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

식 (8)을 좌표변환식 (9)를 이용하여 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_i(t) &= Ae_i(t) \\ &+ BK_\theta \sum_{j=1}^N l_{ij}(x_j(t-\Delta) - x_N(t-\Delta) + x_N(t-\Delta)) \\ &- BK_\theta \sum_{j=1}^N l_{Nj}(x_j(t-\Delta) - x_N(t-\Delta) + x_N(t-\Delta)) \end{aligned} \quad (11)$$

식 (10)은  $\sum_{j=1}^N l_{ij} = 0$ 를 고려하면 다음과 같이 간단히 된다.

$$\dot{e}_i(t) = Ae_i(t) + \Delta f_i + BK_\theta \sum_{j=1}^{N-1} (l_{ij} - l_{Nj}) e_j(t - \Delta) \quad (12)$$

$e(t) = (e_1^T(t), \dots, e_{N-1}^T(t))^T$ 으로 정의하면 식 (11)은 다음과 같이 행렬형태로 정리할 수 있다.

$$\dot{e}(t) = (I_{N-1} \otimes A)e(t) + (\bar{L} \otimes BK_\theta)e(t - \Delta) \quad (13)$$

식 (9)를 고려하면 일치조건  $x_1(t) = \dots = x_N(t)$ 과 조건  $e(t) = 0$ 이 등가임을 보이는 것은 매우 쉽다. 따라서, 식 (1)의 일치문제를 식 (12)의 안정화문제로 바꾸어 생각할 수 있다. 지금부터 식 (12)의 안정화 조건을 유도해보자. 먼저, 다음과 같은 라이프니츠 공식을 고려한다.

$$e(t - \Delta) = e(t) - \int_{t-\Delta}^t \dot{e}(s) ds \quad (14)$$

식 (13)을 이용하면 식 (12)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= (I_{N-1} \otimes A)e(t) + (\bar{L} \otimes BK_\theta)e(t) \\ &- (\bar{L} \otimes BK_\theta) \int_{t-\Delta}^t \dot{e}(s) ds \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 다음과 같은 두 번째 좌표변환을 고려한다.

$$z(t) = (I_{N-1} \otimes \Theta)e(t), \Theta = \text{diag}(\theta, \dots, \theta^n) \quad (16)$$

크로네커곱셈의 성질과 다음과 같은 공식을 이용하면

$$\Theta A \Theta^{-1} = \frac{1}{\theta} A, \Theta BK_\theta \Theta^{-1} = \frac{1}{\theta} BK \quad (17)$$

식 (14)는 다음처럼 변환된다.

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= (I_{N-1} \otimes \Theta A \Theta^{-1})z(t) + (\bar{L} \otimes \Theta BK_\theta \Theta^{-1})z(t) \\ &- (\bar{L} \otimes \Theta BK_\theta \Theta^{-1}) \int_{t-\Delta}^t \dot{z}(s) ds \\ &= \frac{1}{\theta} (I_{N-1} \otimes A)z(t) + \frac{1}{\theta} (\bar{L} \otimes BK)z(t) \\ &- \frac{1}{\theta} (\bar{L} \otimes BK) \int_{t-\Delta}^t \dot{z}(s) ds \end{aligned} \quad (18)$$

만약 정리1의 가정이 만족된다면 다음과 같은 세 번째 좌표변환을 고려한다.

$$\epsilon(t) = (I_{N-1} \otimes P^{-1})z(t) \quad (19)$$

위식에서 행렬  $P$ 는 식 (6)의 해이다. 식 (18)과 크로네커곱셈의 성질을 이용하면 식 (17)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}(t) &= \frac{1}{\theta} (I_{N-1} \otimes P^{-1} A P) \epsilon(t) \\ &+ \frac{1}{\theta} (\bar{L} \otimes P^{-1} B K P) \epsilon(t) \\ &- \frac{1}{\theta} (\bar{L} \otimes P^{-1} B K P) \int_{t-\Delta}^t \dot{\epsilon}(s) ds \end{aligned} \quad (20)$$

식 (19)의 안정도 해석을 위하여 다음과 같은 Lyapunov-Krasovskii functional을 고려한다.

$$\begin{aligned} V(t) &= \epsilon^T(t) (I_{N-1} \otimes P) \epsilon(t) \\ &+ \int_{-\Delta}^0 \int_{t+\beta}^t \|\dot{\epsilon}(\alpha)\|^2 d\alpha d\beta \end{aligned} \quad (21)$$

식 (20)의 도함수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \frac{1}{\theta} \epsilon^T(t) [I_{N-1} \otimes (P A^T + A P) \\ &+ \bar{L} \otimes (B K P) + \bar{L}^T \otimes (B K P)^T] \epsilon(t) \\ &- \frac{2}{\theta} \epsilon^T(t) (\bar{L} \otimes (B K P)) \int_{t-\Delta}^t \dot{\epsilon}(s) ds \\ &+ \Delta \epsilon^T(t) \dot{\epsilon}(t) - \int_{t-\Delta}^t \|\dot{\epsilon}(\alpha)\|^2 d\alpha \end{aligned} \quad (22)$$

식 (21)에서  $KP = Y$ 으로 정의하고 식 (6)이 만족되면 다음의 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} [I_{N-1} \otimes (P A^T + A P) + \bar{L} \otimes (B K P) + \bar{L}^T \otimes (B K P)^T] \\ \leq -\mu (I_{N-1} \otimes I_n) \end{aligned} \quad (23)$$

또한, Young과 Jensen의 부등식을 이용하면 다음을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} &-\frac{2}{\theta} \epsilon^T(t) (\bar{L} \otimes (B K P)) \int_{t-\Delta}^t \dot{\epsilon}(s) ds \\ &\leq \frac{\mu}{2\theta} \|\epsilon(t)\|^2 + \frac{2}{\mu\theta} \|\bar{L} \otimes (B K P)\|^2 \left\| \int_{t-\Delta}^t \dot{\epsilon}(s) ds \right\|^2 \\ &\leq \frac{\mu}{2\theta} \|\epsilon(t)\|^2 + \frac{2\Delta}{\mu\theta} \|\bar{L} \otimes (B K P)\|^2 \int_{t-\Delta}^t \|\dot{\epsilon}(s)\|^2 ds \end{aligned} \quad (24)$$

식 (19)의 양변에 놈(norm)을 취하고 제곱한 후 삼각 부등식과 Jensen의 부등식을 이용하면 다음의 식을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 & \Delta \dot{\epsilon}^T(t) \dot{\epsilon}(t) \\
 & \leq \frac{2\Delta}{\theta^2} \| I_{N-1} \otimes P^{-1}AP + \bar{L} \otimes P^{-1}BKP \|^2 \| \epsilon(t) \|^2 \\
 & + \frac{2\Delta}{\theta^2} \| (\bar{L} \otimes P^{-1}BKP) \|^2 \left\| \int_{t-\Delta}^t \dot{\epsilon}(s) ds \right\|^2 \\
 & \leq \frac{2\Delta}{\theta^2} \| I_{N-1} \otimes P^{-1}AP + \bar{L} \otimes P^{-1}BKP \|^2 \| \epsilon(t) \|^2 \\
 & + \frac{2\Delta^2}{\theta^2} \| (\bar{L} \otimes P^{-1}BKP) \|^2 \left\| \int_{t-\Delta}^t \dot{\epsilon}(s) \right\|^2 ds
 \end{aligned} \tag{25}$$

식 (22),(23),(24)을 이용하면 식 (21)은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 & \dot{V}(t) \\
 & \leq \left( -\frac{\mu}{2\theta} + \frac{2\Delta}{\theta^2} \| I_{N-1} \otimes P^{-1}AP + \bar{L} \otimes P^{-1}BKP \|^2 \right) \| \epsilon(t) \|^2 \\
 & + \left( \frac{2\Delta}{\mu\theta} \| \bar{L} \otimes (BKP) \|^2 + \frac{2\Delta^2}{\theta^2} \| (\bar{L} \otimes P^{-1}BKP) \|^2 - 1 \right) \cdot \\
 & \int_{t-\Delta}^t \| \dot{\epsilon}(s) \|^2 ds
 \end{aligned} \tag{26}$$

여기서,  $\dot{V}(t) < 0$ 를 만들기 위하여 다음의 식이 만족되어야 한다.

$$\begin{aligned}
 & \left( -\frac{\mu}{2\theta} + \frac{2\Delta}{\theta^2} \| I_{N-1} \otimes P^{-1}AP + \bar{L} \otimes P^{-1}BKP \|^2 \right) < 0 \\
 & \left( \frac{2\Delta}{\mu\theta} \| \bar{L} \otimes (BKP) \|^2 + \frac{2\Delta^2}{\theta^2} \| (\bar{L} \otimes P^{-1}BKP) \|^2 - 1 \right) < 0
 \end{aligned} \tag{27}$$

정리1의 가정에 의하여 식 (6)을 만족시키는  $P, K, \mu$ 가 존재한다면  $0 < \Delta < \infty$ 을 만족시키는 모든 시간 지연  $\Delta$ 에 대하여도 식 (26)을 만족시키는 설계변수  $\theta > 0$ 가 항상 존재함을 보이는 것은 어렵지 않다. 따라서, 부등식 (27)을 만족시키는  $\theta > 0$ 에 대하여 식 (19)은 점근적으로 안정하고 이것은 식 (1)의 모든 상태변수가 점근적으로 일치에 도달함을 의미한다. ■

**고찰 1:** 기존의 연구들에서 제시된 충분조건들은 유한한 모든 통신지연값에 대하여 일치를 보장하지 못한다. 그러나, 본 논문에서는  $0 < \Delta < \infty$ 을 만족시키는 모든 시간지연  $\Delta$ 에 대해서도 파라미터  $\theta$ 를 부등식 (27)을 만족시키도록 선택하면 일치문제를 항상 해결할 수 있음을 증명하였다.

#### IV. 모의 실험

본 논문에서 제안한 설계 방법의 유효성을 증명하기

위하여 다음과 같은 다개체 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned}
 & \dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bu_i(t), i = 1, \dots, 4 \\
 & A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \\
 & x_i(t) = (x_{i1}(t) \ x_{i2}(t) \ x_{i3}(t))^T \in R^3
 \end{aligned} \tag{28}$$

다개체 시스템의 통신 네트워크는 그림1과 같은 그림 1의 라플라시안 행렬은 다음과 같다.

$$L = \begin{bmatrix} 6 & -1 & -2 & -3 \\ -3 & 4 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -2 \\ -1 & -2 & -3 & 6 \end{bmatrix} \tag{29}$$

또한, 개체들간의 통신 네트워크의 지연은  $\Delta = 10$ 으로 가정한다. SCILAB 소프트웨어를 이용하여 식 (6)을 풀면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 & P = \begin{pmatrix} 8740.39 & -1726.57 & -2027.65 \\ -1726.57 & 3041.98 & -1620.80 \\ -2027.65 & -1620.80 & 3678.70 \end{pmatrix}, \\
 & Y = (278.65 \ -1620.80 \ -3678.70), \\
 & \mu = 780.88.
 \end{aligned} \tag{30}$$

일치 제어기 (5)의 이득행렬  $K$ 와 파라미터  $\theta$ 는 다음과 같다.

$$K = YP^{-1} = [-0.202 \ -0.585 \ -0.511], \theta = 50 \tag{31}$$

설계파라미터  $\theta$ 는 식 (26)으로부터 계산할 수 있다. 모의실험에 사용된 각 개체의 초기값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & x_1(t) = (0 \ -30 \ 0)^T, -\Delta \leq t \leq 0 \\
 & x_2(t) = (200 \ -20 \ 0.1)^T \\
 & x_3(t) = (400 \ -10 \ 0.2)^T \\
 & x_4(t) = (600 \ 0 \ 0.3)^T
 \end{aligned} \tag{32}$$

그림 2,3,4은 각 개체의 상태변수의 그래프를 나타낸다. 그림에서 보듯이 매우 큰 네트워크 지연이 존재함에도 불구하고 모두 점근적으로 일치상태에 도달함을 볼 수 있다.

#### V. 결론

본 논문에서는 네트워크 시간지연이 존재하는 다개체 시스템의 일치문제를 다루었다. 기존의 연구결과와는 달리,  $0 < \Delta < \infty$ 을 만족시키는 모든 시간지연  $\Delta$ 에 대하여 제한한 제어기가 일치문제를 해결할 수 있음을 증명하였다. 마지막으로 모의실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 입증하였다.

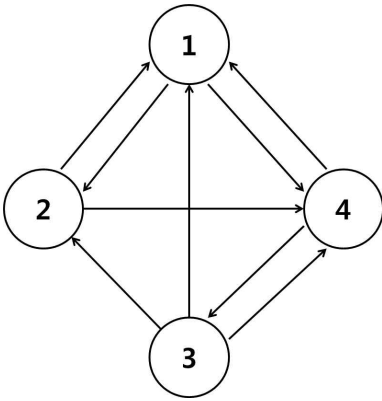


Fig. 1. Network topology  
 그림 1. 네트워크 토폴로지

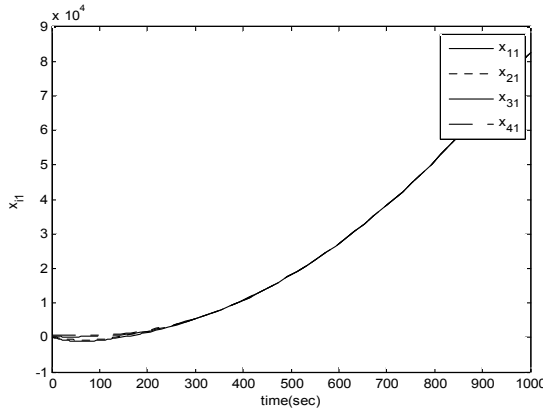


Fig. 2. The trajectories of  $x_{i1}(t), i = 1, \dots, 4$ .  
 그림 2.  $x_{i1}(t), i = 1, \dots, 4$ 의 그래프

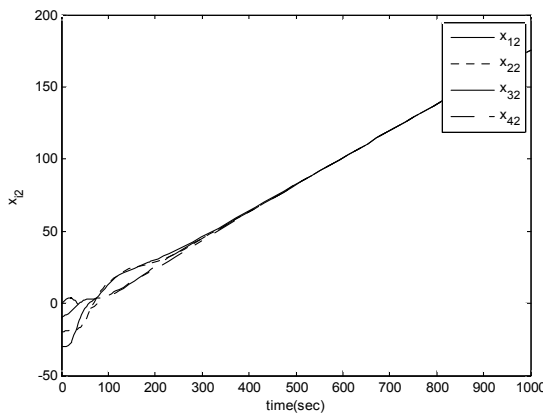


Fig. 3. The trajectories of  $x_{i2}(t), i = 1, \dots, 4$ .  
 그림 3.  $x_{i2}(t), i = 1, \dots, 4$ 의 그래프

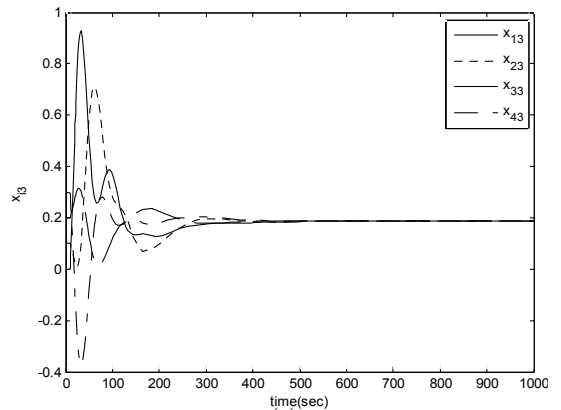


Fig. 4. The trajectories of  $x_{i3}(t), i = 1, \dots, 4$ .  
 그림 4.  $x_{i3}(t), i = 1, \dots, 4$ 의 그래프

### References

- [1] R. Olfati-Saber, and R. Murray, "Consensus Problems in Networks of Agents With Switching Topology and Time-Delays," IEEE Trans. Automat. Control, vol. 49, no. 9, pp. 1520-1533, 2004.
- [2] J. Seo, H. Shim, and J. Back, "Consensus of high-order linear systems using dynamic output feedback compensator: Low gain approach," Automatica, vol. 45, pp. 2659-2664, 2009.
- [3] H. Kim, H. Shim, and J. Seo, "Output Consensus of Heterogeneous Uncertain Linear Multi-Agent Systems," IEEE Trans. Automat. Control, vol. 56, no. 1, pp. 200-206, 2011.
- [4] P. Wieland, R. Sepulchre, and F. Allgöwer, "An internal model principle is necessary and sufficient for linear output synchronization," Automatica, vol. 47, pp. 1068 - 1074, 2011.
- [5] Z. Li, Z. Duan, G. Chen, and L. Huang, "Consensus of Multiagent Systems and Synchronization of Complex Networks: A Unified Viewpoint," IEEE Trans. Circuits & Systems-I: Regular Papers, vol. 57, no. 1, pp. 213-224, 2010.
- [6] H. L. Trentelman, K. Takaba, and N. Monshizadeh, "Robust Synchronization of Uncertain Linear Multi-Agent Systems," IEEE Trans. On Automat. Contr., vol.58, no.6, June 2013, pp1511~1523.
- [7] Z. Li, W. Ren, X. Liu, and M. Fu, "Consensus of Multi-Agent Systems With General Linear and

- Lipschitz Nonlinear Dynamics Using Distributed Adaptive Protocols,” IEEE Trans. Automat. Control, vol. 58, no. 7, pp.1786-1791, 2013.
- [8] P. Lin, Y. Jia, and L. Li, “Distributed robust H infinite consensus control in directed networks of agents with time-delay,” Systems & Control Letters, vol. 57, pp. 643 - 653, 2008.
- [9] Y.G. Sun and L. Wang, “Consensus of Multi-Agent Systems in Directed Networks With Nonuniform Time-Varying Delays,” IEEE Trans. Automat. Control, vol. 54, no. 7, pp. 1607-1613, 2009.
- [10] Y.G. Sun, L. Wang, and G. Xie, “Average consensus in networks of dynamic agents with switching topologies and multiple time-varying delays,” Systems & Control Letters, vol. 57, pp. 175 - 183, 2008.
- [11] Y. Cui, and Y. Jia, “L2-Linfinite consensus control for high-order multi-agent systems with switching topologies and time-varying delays,” IET Control Theory & Applications, vol.6, iss.12. pp.1933-1940, 2012

---

BIOGRAPHY

---

**Lee Sungryul** (Member)

1996 : B.S. degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

1998 : M.S. degree in Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University.

2003 : Ph.D. degree in Electrical & Electronic Engineering, Yonsei

University.

2003~2006 : Research Engineer, Samsung Electronics.

2007~ : Professor, Kunsan National University