

논문 2019-14-30

사이버공격에 강인한 사이버물리시스템의 제어 (Control of Cyber-Physical Systems Under Cyber-Attacks)

이 태 희*
(Tae H. Lee)

Abstract : This paper addresses the control problem of cyber-physical systems under controller attack. A novel discontinuous Lyapunov functionals are employed to fully utilize sampled-data pattern which characteristic is commonly appeared in cyber-physical systems. By considering the limited resource of networks, cyber-attacks on the controller are considered randomly occurring and are described as an attack function which is nonlinear but assumed to be satisfying Lipschitz condition. Novel criteria for designing controller with robustness for cyber-attacks are developed in terms of linear matrix inequality (LMI). Finally, a numerical example is given to prove the usefulness of the proposed method.

Keywords : Cyber-physical system, Sampled-data, Cyber-attack, Looped-functional

I. 서 론

센서와 같은 소자 기술, 정보를 처리하는 컴퓨팅 기술, 대량의 데이터를 송수신하는 통신기술 등의 급격한 발달에 근거하여 가상공간과 물리적 공간이 사이버물리시스템으로 결합되고 있다. 이러한 사이버물리시스템의 제어를 위한 구조는 대부분 제어 대상 시스템과 제어가 네트워크로 연결된 형태로 구성되어지고 있다 [1, 2]. 사이버물리시스템의 이러한 제어구조는 설치의 용이성, 관리의 용이성, 고장 진단 및 보수의 용이성 등의 다양한 장점으로 인하여 산업현장에서 선호되고 있다. 반면, 단점으로는 네트워크 리소스의 한계로 인한 패킷손실, 네트워크를 통하여 전송될 때의 시간지연 및 외란입력의 가능성 증가 등이 존재한다. 특히 최근 들어 해커에 의한 사이버 공격이 큰 문제로 대두되고 있어, 이는 사이버물리시스템을 위한 제어기 설계 시 반드시 고려해야 할 요소로 본 장의 후반부에 자세하게 다룰 것이다.

사이버물리시스템을 구성하는 대상 시스템이 연속 시스템일 경우 제어기를 설계할 때에 반드시 고려해야 할 사항이 있는데 이는 연속신호를 디지털 소자를 이용하여 네트워크를 통해 패킷단위로 전송하는 데에서 발생하는 문제이다. 수신기와 송신기를 사용하여 네트워크 통신을 통해 신호를 송수신하게 되는데 이 송신기와 수신기는 디지털 소자로써 자체적인 샘플링 순간에 신호를 센싱하고 이를 송수신하게 된다. 따라서 이러한 시스템에서는 연속시스템의 정보를 디지털 장치가 이산신호로 변환하여 제어로 송신하게 되고 이 이산화된 정보를 이용하여 제어기를 설계하여야 한다. 또한 설계된 제어신호를 디지털 장치를 통하여 연속시스템에 인가해야 하는데 연속시스템에 이산신호를 바로 인가할 수 없으므로 zero-order-hold (ZOH)라는 추가적인 장치를 이용하여 비연속신호로 인가하게 된다. 최종적으로 연속시스템으로 구성된 사이버물리시스템의 제어는 연속신호, 이산신호, 비연속신호 세 가지 종류의 신호가 공존하는 하이브리드 시스템으로써 해석이 필요하고, 이를 다루는데 특별한 기술들이 필요하게 된다. 대표적인 방법으로 비연속 (Discontinuous) 리아푸노프 함수를 이용하는 방법 [3-5], 궤환함수 (Looped-functional)를 이용한 리아푸노프 방법 [6, 7] 등이 있다. 최신의 연구결과를 반영하기 위하여 본 논문에서는 새로운 궤환 형태의 함수를 리아푸노프 함수로 도입하여 샘플치 제어를 설계하고자 한다. 여기서 샘플치 제어기란, 샘플

*Corresponding Author (thlee@jbnu.ac.kr)

Received: Sep. 9, 2019, Revised: Sep. 18, 2019,

Accepted: Sep. 19, 2019.

T.H. Lee: Jeonbuk National University.

※ 본 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2018R1C1B5036886).

링 주기 동안 제어신호가 상수로 존재하며, 오직 샘플링 순간에만 제어신호를 갱신할 수 있는 제어를 말한다. 이러한 계단형태의 특별한 샘플링 패턴을 고려한 샘플치 제어기설계 문제는 일반적인 제어기의 설계보다 좀 더 까다로운 절차를 요구한다. 연속시스템을 이산화하여 이산시스템으로 변환하고 디지털제어를 설계하는 방법 [8], 디지털제어를 연속형태의 제어기로 간주하고 설계한 후 디지털제어기로 변환하는 방법 [9], 불연속적인 제어 입력 신호를 시변 시간지연된 신호로 해석하여 제어기를 설계하는 방법 [10] 등이 있다. 본 논문에서는 마지막에 언급된 시변 시간지연된 신호로 다루어 제어기를 설계하는 방법을 이용하고자 한다.

통신을 이용한 신호의 전송이 일반화 되면서 통신 보안 및 사이버 공격을 고려한 기술들의 개발이 절실해 지고 있다. 사이버물리시스템에서 사이버공격은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 일반적으로 잘 아는 DoS 공격이다. DoS 공격은 해커가 시스템을 마비시키기 위한 목적으로 서버나 네트워크의 리소스를 훨씬 상회하는 트래픽을 인위적으로 생성시킴으로써 시스템을 서비스불능 상태로 만드는 공격이다. 두 번째는 Deception 공격으로 해커가 원하는 방향으로 시스템을 움직이도록 본래의 데이터를 강탈하고 자신이 인위적으로 조작한 데이터로 바꿔치기 하는 공격이다. 제어기에 이 공격을 수행한다면 해커는 시스템을 자신의 의도대로 제어할 수 있는 제어신호를 마음대로 인가할 수 있게 된다. 대표적인 두 가지 사이버공격을 고려한 제어기 설계문제는 많은 논문들에서 다루어지고 있다 [11-14]. 본 논문에서는 Deception 공격을 고려하여 이에 강인한 제어기를 설계하고자 한다.

II. 본 론

1. 문제 설정

본 논문에서는 다음의 연속시간 선형시스템을 고려한다.

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

여기서 $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ 는 시스템의 상태벡터, $u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T$ 는 제어입력, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 은 알고 있는 상수행렬이다.

본 논문에서는 제어기에 사이버공격이 존재하는 사이버물리시스템의 제어기를 설계하고자 한다. 여

기서 네트워크를 통해 대상시스템과 제어가 데이터를 주고 받기위해서 샘플러가 대상시스템의 상태 정보를 샘플링하여 이산데이터로 전송하게 된다. 제어기는 수신된 이산데이터를 기반으로 이산제어신호를 생성하고 이를 다시 네트워크를 통해 대상시스템에 인가하게 되는데, 이 때, ZOH를 사용하여 연속신호로 변환하여 시스템에 인가하게 된다. 이러한 현상을 고려하여 다음의 샘플치 제어기를 설계하고자 한다.

$$u^S(t) = Kx(t_k), \quad t_k \leq t < t_{k+1} \quad (2)$$

여기서 K 는 설계 할 제어이득행렬, t_k 는 ZOH의 갱신시점으로 ZOH의 갱신시간 간격은 $h = t_{k+1} - t_k$ 로 주어지며, 여기서 h 는 알고 있는 양의 상수이다.

또한, 본 논문에서는 제어기에 Deception 공격을 가정하여 이에 강인한 제어기를 설계하고자 한다. 서론에서 소개한대로 Deception 공격이란 해커가 공격대상을 자신의 의도대로 제어하기 위하여 본래의 제어입력을 강탈하고 자신이 설계한 제어입력을 인가하는 공격을 일컫는다. 하지만 사이버공격은 네트워크의 리소스의 한계로 간헐적으로 일어날 수밖에 없다. 이러한 현상을 종합적으로 고려하기 위하여 본 논문에서는 다음 수식으로 설계되는 제어기를 고려하고자 한다.

$$u(t) = (1 - \alpha(t))Kx(t_k) + \alpha(t)Cg(x(t_k)) \quad (3)$$

여기서 $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 인 알고 있는 상수 행렬, $\alpha(t)$ 는 베르누이 확률변수로 0 또는 1의 값을 가지며, $\alpha(t) = 1$ 을 가질 확률은 α 로 알고 있다. $g(x(t)) = [g(x_1(t)), g(x_2(t)), \dots, g(x_n(t))]^T$ 는 해커가 삽입하는 제어신호를 표현하는 비선형 함수로 다음의 조건을 만족한다.

$$g(0) = 0, \quad 0 \leq \frac{g(a) - g(b)}{a - b} \leq d \quad (4)$$

여기서 d 는 알고 있는 양의 상수이다.

최종적으로 본 논문에서 고려하는 사이버물리시스템의 수식을 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + (1 - \alpha(t))BKx(t_k) + \alpha(t)BCg(x(t_k)) \quad (5)$$

다음의 보조정리는 주요결과를 유도하는데 필수적으로 사용된다.

보조정리 1. [15] $a \leq b \leq c$ 를 만족하는 세 개의 양의 상수와, $R_1, R_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 의 양한정 상수행렬, $S \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ 의 상수행렬을 고려할 때, 다음의 부등식이 성립한다.

$$\int_a^b x^T(s)R_1x(s)ds + \int_b^c x^T(s)R_2x(s)ds \geq \eta^T(t)\Xi\eta(t),$$

여기서

$$\Xi = \begin{bmatrix} \text{diag}\{R_1, 3R_1\} & S \\ S^T & \text{diag}\{R_2, 3R_2\} \end{bmatrix},$$

$$\eta(t) = \begin{bmatrix} x(b) - x(a) \\ x(b) + x(a) - \frac{2}{b-a} \int_a^b x(s)ds \\ x(c) - x(b) \\ x(c) + x(b) - \frac{2}{c-b} \int_b^c x(s)ds \end{bmatrix}.$$

2. 주요 결과

주요결과를 소개하기 전에 다음의 벡터와

$$\zeta(t) = \left[x^T(t), \dot{x}^T(t), x^T(t_k), x^T(t_{k+1}), \frac{1}{t-t_k} \int_{t_k}^t x(s)ds, \frac{1}{t_{k+1}-t} \int_t^{t_{k+1}} x(s)ds, g(x(t_k)) \right]^T,$$

다음의 블록행렬 e_i ($i=1, \dots, 7$) $\in \mathbb{R}^{7n \times n}$ (예를 들어 $e_3 = [0, 0, I_n, 0, 0, 0, 0]^T$) 을 정의 한다.

이론 1. 제어이득 K 와 양의 상수 h, α, d 가 주어지고, 다음의 선형행렬부등식 (6)과 (7)을 만족하는 양한정 행렬 P, Q, R 과 양한정 대각행렬 X, Y, Z 가 역대칭 행렬 L, S 가 존재한다면, 시스템 (5)는 제어기 (3)에 의해 안정화 된다.

$$\Omega_1 + h\Omega_2 < 0 \tag{6}$$

$$\Omega_1 + h\Omega_3 < 0 \tag{7}$$

여기서

$$\Omega_1 = 2e_1Pe_2^T - 2(e_1 - e_3)[Q_2 \ Q_3]\Pi_2^T - 2(e_4 - e_1)[R_2 \ R_3]\Pi_2^T - \Pi_3Z\Pi_3^T + 2(e_3D - e_7)Xe_7^T + e_3DYDe_3^T - e_7Ye_7^T + 2(e_1 + e_2)L(-e_2^T + Ae_1^T + (1 - \alpha(t))BK)e_3^T + \alpha(t)BCe_7^T,$$

$$\Omega_2 = \Pi_1Q\Pi_1^T - \Pi_2 \begin{bmatrix} R_1 & R_5 \\ R_5^T & R_6 \end{bmatrix} \Pi_2^T,$$

$$\Omega_3 = -\Pi_1R\Pi_1^T - \Pi_2 \begin{bmatrix} Q_4 & Q_5 \\ Q_5^T & Q_6 \end{bmatrix} \Pi_2^T,$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_2 & Q_3 \\ Q_2^T & Q_4 & Q_5 \\ Q_3^T & Q_5^T & Q_6 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ R_2^T & R_4 & R_5 \\ R_3^T & R_5^T & R_6 \end{bmatrix},$$

$$Z = \begin{bmatrix} \text{diag}\{Q_1, 3Q_1\} & S \\ S^T & \text{diag}\{R_1, 3R_1\} \end{bmatrix},$$

$$\Pi_1 = [e_2, e_3, e_4], \Pi_2 = [e_3, e_4],$$

$$\Pi_3 = [e_1 - e_3, e_1 + e_3 - 2e_5, e_4 - e_1, e_4 + e_1 - 2e_6]$$

이다.

증명. 다음의 리아푸노프 함수를 고려하자.

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t) \tag{8}$$

여기서

$$V_1(t) = x^T(t)Px(t),$$

$$V_2(t) = (t_{k+1} - t) \int_{t_k}^t v^T(s)Qv(s)ds,$$

$$V_3(t) = -(t - t_k) \int_t^{t_{k+1}} v^T(s)Rv(s)ds,$$

$$v(t) = [x^T(t), x^T(t_k), x^T(t_{k+1})]^T$$

이다.

리아푸노프 함수 $V_2(t_k), V_2(t_{k+1}), V_3(t_k), V_3(t_{k+1})$ 은 모두 0이므로 최종적으로 $V(t)$ 는 모든 샘플링 순간인 t_k 에 양의 값을 가지는 케환함수임을 알 수 있다.

리아푸노프 함수 $V(t)$ 를 미분하면 다음의 결과를 얻게 된다.

$$\dot{V}_1(t) = 2x^T(t)P\dot{x}(t) = 2\zeta^T(t)e_1Pe_2^T\zeta(t) \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &= (t_{k+1} - t)v^T(t)Qv(t) - \int_{t_k}^t v^T(s)Qv(s)ds \\ &= (t_{k+1} - t)v^T(t)Qv(t) \\ &\quad - (t - t_k) \begin{bmatrix} x(t_k) \\ x(t_{k+1}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Q_4 & Q_5 \\ Q_5^T & Q_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_k) \\ x(t_{k+1}) \end{bmatrix} \\ &\quad - 2(x(t) - x(t_k))[Q_2 \ Q_3] \begin{bmatrix} x(t_k) \\ x(t_{k+1}) \end{bmatrix} \\ &\quad - \int_{t_k}^t x^T(s)Q_1\dot{x}(s)ds \\ &= \zeta^T(t)((t_{k+1} - t)\Pi_1Q\Pi_1^T \\ &\quad - (t - t_k)\Pi_2 \begin{bmatrix} Q_4 & Q_5 \\ Q_5^T & Q_6 \end{bmatrix} \Pi_2^T \\ &\quad - 2(e_1 - e_3)[Q_2 \ Q_3]\Pi_2^T)\zeta(t) \\ &\quad - \int_{t_k}^t x^T(s)Q_1\dot{x}(s)ds \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
\dot{V}_3(t) &= -(t-t_k)v^T(t)Rv(t) - \int_t^{t_{k+1}} v^T(s)Rv(s)ds \\
&= -(t-t_k)v^T(t)Rv(t) \\
&\quad - (t_{k+1}-t) \begin{bmatrix} x(t_k) \\ x(t_{k+1}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R_4 & R_5 \\ R_5^T & R_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_k) \\ x(t_{k+1}) \end{bmatrix} \\
&\quad - 2(x(t_{k+1})-x(t)) \begin{bmatrix} R_2 & R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_k) \\ x(t_{k+1}) \end{bmatrix} \\
&\quad - \int_t^{t_{k+1}} \dot{x}^T(s)R_1\dot{x}(s)ds \\
&= \zeta^T(t) \left(-(t-t_k)\Pi_1 R \Pi_1^T \right. \\
&\quad \left. - (t_{k+1}-t)\Pi_2 \begin{bmatrix} R_4 & R_5 \\ R_5^T & R_6 \end{bmatrix} \Pi_2^T \right. \\
&\quad \left. - 2(e_4 - e_1) \begin{bmatrix} R_2 & R_3 \end{bmatrix} \Pi_2^T \right) \zeta(t) \\
&\quad - \int_t^{t_{k+1}} \dot{x}^T(s)R_1\dot{x}(s)ds
\end{aligned} \tag{11}$$

식 (10)과 (11)의 적분항들은 보조정리 1에 의해 다음의 수식 (12)로 상계할 수 있다.

$$\begin{aligned}
& - \int_{t_k}^t \dot{x}^T(s)Q_1\dot{x}(s)ds - \int_t^{t_{k+1}} \dot{x}^T(s)R_1\dot{x}(s)ds \\
& \leq -\nu^T(t)Z\nu(t) \\
& = \zeta^T(t)\Pi_3 Z \Pi_3^T \zeta(t)
\end{aligned} \tag{12}$$

여기서

$$\nu(t) = \begin{bmatrix} x(t) - x(t_k) \\ x(t) + x(t_k) - \frac{2}{t-t_k} \int_{t_k}^t x(s)ds \\ x(t_{k+1}) - x(t) \\ x(t_{k+1}) + x(t) - \frac{2}{t_{k+1}-t} \int_t^{t_{k+1}} x(s)ds \end{bmatrix}$$

이다.

비선형 함수 $g(\cdot)$ 의 성질에 따라, 양한정 대각 행렬 X 와 Y 를 도입하면 다음의 수식 (13)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
0 & \leq 2(x^T(t_k)D - g^T(x(t_k)))Xg(x(t_k)) \\
& \quad + x^T(t_k)DYDx(t_k) - g^T(x(t_k))Yg(x(t_k)) \\
& = \zeta^T(t) \left(2(e_3D - e_7)Xe_7^T + e_3DYDe_3^T \right. \\
& \quad \left. - e_7Ye_7^T \right) \zeta(t)
\end{aligned} \tag{13}$$

또한, 시스템 (5)에 따라, 행렬 L 을 고려하면 다음의 수식 (14)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
0 & = 2[x^T(t) + x^T(t)]L[-\dot{x}(t) + Ax(t) \\
& \quad + (1-\alpha(t))BKx(t_k) + \alpha(t)B\dot{y}(Cx(t_k))] \\
& = \zeta^T(t) \left(2(e_1 + e_2)L(-e_2^T + Ae_1^T \right. \\
& \quad \left. + (1-\alpha(t))BK\bar{e}_3^T + \alpha(t)BC\bar{e}_7^T) \right) \zeta(t)
\end{aligned} \tag{14}$$

최종적으로 수식 (9)-(14)에 따라 다음의 수식 (15)를 얻을 수 있다.

$$\dot{V}(t) \leq \zeta^T(t) \left(\frac{t_{k+1}-t}{h} (\Omega_1 + h\Omega_2) + \frac{t-t_k}{h} (\Omega_1 + h\Omega_3) \right) \zeta(t) \tag{15}$$

따라서 만약 선형행렬부등식 (6)과 (7)을 만족한다면, $\dot{V}(t) < 0$ 을 보장하게 되고, 리아푸노프 안정성 이론에 따라 시스템 (5)은 안정하다고 말할 수 있다. 이로써 증명을 마친다.

이론 1은 제어이득 K 를 알 때 시스템의 안정성을 검증하는 조건으로, 이 조건을 가지고는 제어를 설계 할 수 없다. 따라서 제어기 설계를 위한 다음의 조건을 제시한다.

이론 2. 양의 상수 h, α, d 가 주어지고, 다음의 선형행렬부등식 (16)과 (17)을 만족하는 양한정 행렬 $\bar{P}, \bar{Q}, \bar{R}$ 과 양한정 대각행렬 \bar{X}, \bar{Y} , 가역대칭행렬 \bar{L} , 행렬 M, \bar{S} 가 존재한다면, 시스템 (5)는 제어기 (3)에 의해 안정화 된다. 또한 제어이득은 $K = M\bar{L}^{-1}$ 으로 설계 할 수 있다.

$$\bar{\Omega}_1 + h\bar{\Omega}_2 < 0 \tag{16}$$

$$\bar{\Omega}_1 + h\bar{\Omega}_3 < 0 \tag{17}$$

여기서

$$\begin{aligned}
\bar{\Omega}_1 & = 2e_1\bar{P}e_2^T - 2(e_1 - e_3) \begin{bmatrix} \bar{Q}_2 & \bar{Q}_3 \end{bmatrix} \Pi_2^T \\
& \quad - 2(e_4 - e_1) \begin{bmatrix} \bar{R}_2 & \bar{R}_3 \end{bmatrix} \Pi_2^T - \Pi_3 Z \Pi_3^T, \\
& \quad + 2(e_3D - e_7)\bar{X}e_7^T + e_3D\bar{Y}De_3^T - e_7\bar{Y}e_7^T \\
& \quad + 2(e_1 + e_2)(-\bar{L}e_1^T + A\bar{L}e_1^T + (1-\alpha(t))BM\bar{e}_3^T \\
& \quad + \alpha(t)BC\bar{L}e_7^T),
\end{aligned}$$

$$\bar{\Omega}_2 = \Pi_1 \bar{Q} \Pi_1^T - \Pi_2 \begin{bmatrix} \bar{R}_4 & \bar{R}_5 \\ \bar{R}_5^T & \bar{R}_6 \end{bmatrix} \Pi_2^T,$$

$$\bar{\Omega}_3 = -\Pi_1 \bar{R} \Pi_1^T - \Pi_2 \begin{bmatrix} \bar{Q}_4 & \bar{Q}_5 \\ \bar{Q}_5^T & \bar{Q}_6 \end{bmatrix} \Pi_2^T,$$

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_1 & \bar{Q}_2 & \bar{Q}_3 \\ \bar{Q}_2^T & \bar{Q}_4 & \bar{Q}_5 \\ \bar{Q}_3^T & \bar{Q}_5^T & \bar{Q}_6 \end{bmatrix}, \bar{R} = \begin{bmatrix} \bar{R}_1 & \bar{R}_2 & \bar{R}_3 \\ \bar{R}_2^T & \bar{R}_4 & \bar{R}_5 \\ \bar{R}_3^T & \bar{R}_5^T & \bar{R}_6 \end{bmatrix},$$

$$\bar{Z} = \begin{bmatrix} \text{diag}\{\bar{Q}_1, 3\bar{Q}_1\} & \\ & \bar{S} \\ & & \text{diag}\{\bar{R}_1, 3\bar{R}_1\} \end{bmatrix},$$

이고, 나머지 기호들은 이론 1에서 정의한 바와 같다.

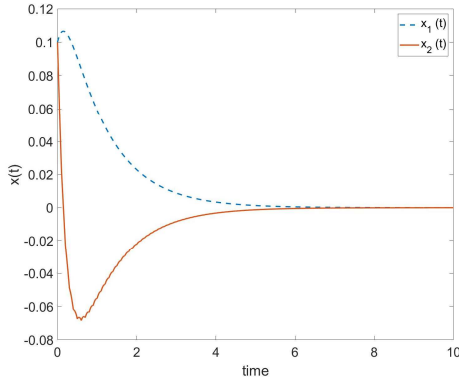


그림 1. 사이버 공격하에 제어입력이 인가된 시스템의 상태과형

Fig. 1 State trajectories of closed-loop system under cyber-attacks

증명. 식 (15)의 양변에 $\text{diag}\{L^{-1}, L^{-1}, L^{-1}, L^{-1}, L^{-1}, L^{-1}, L^{-1}\}$ 을 곱하고 다음의 행렬을 정의한다면 이론 2는 쉽게 증명이 가능하므로 자세한 증명은 생략하도록 한다.

$$\begin{aligned} \bar{P} &= L^{-1}PL^{-1}, \\ \bar{Q} &= \text{diag}\{L^{-1}, L^{-1}, L^{-1}\}Q\text{diag}\{L^{-1}, L^{-1}, L^{-1}\}, \\ \bar{R} &= \text{diag}\{L^{-1}, L^{-1}, L^{-1}\}R\text{diag}\{L^{-1}, L^{-1}, L^{-1}\}, \\ \bar{S} &= \text{diag}\{L^{-1}, L^{-1}\}S\text{diag}\{L^{-1}, L^{-1}\}, \\ \bar{X} &= L^{-1}XL^{-1}, \\ \bar{Y} &= L^{-1}YL^{-1}, \\ M &= KL^{-1}, \\ \bar{L} &= L^{-1} \end{aligned}$$

III. 수치예제

본 장에서는 수치예제를 통해 본 논문에서 유도된 결과인 이론 2의 성능을 보이고자 한다.

다음의 변수값들을 고려하면, 시스템 (1)은 [16]의 모델링에 의해 카트형 역진자 시스템을 의미하게 된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 17.2941 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1765 \end{bmatrix}$$

또한 이론 2를 적용하기 위하여 사용된 변수들의 값은 아래와 같이 설정되었다.

$$C = [11]^T, d = 1, h = 0.1, \alpha = 0.5,$$

$$g(a) = \frac{1}{2}(a+1-|a-1|)$$

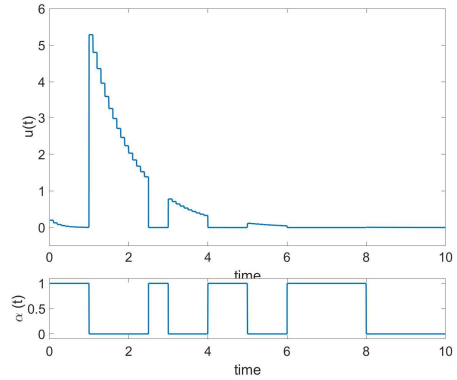


그림 2. 사이버공격 시나리오 $\alpha(t)$ 와 인가된 제어신호 $u(t)$

Fig. 2 Cyber-attacks $\alpha(t)$ and applied control inputs $u(t)$

위에서 제시된 변수값을 이론 2의 조건에 적용하면 다음의 제어이득을 설계할 수 있다.

$$K = [106.572 \quad 31.001]$$

그림 1은 설계된 제어이득을 적용하여 사이버공경하에서 제어를 인가한 시스템의 상태 그래프이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 제어기에 사이버 공격이 존재함에도 불구하고 시스템의 상태가 시간이 지남에 따라 0으로 수렴하여 설계된 제어기가 시스템을 안정화시킴을 알 수 있다.

그림 2는 인가된 제어신호와 사이버공격 패턴을 도식화한 그래프이다.

IV. 결론

본 논문에서는 사이버공격 상황 하에서 제어목적을 달성할 수 있는 사이버물리시스템을 위한 샘플치 제어기 설계에 대한 문제를 다루었다. 사이버공격은 Deception 형태의 공격으로 고려하였고, 네트워크의 리소스의 한계로 인하여 해커의 사이버공격은 지속적이지 않고 랜덤하게 발생하는 상황을 표현하기 위해 베르누이 확률변수를 도입하여 사이버공격을 모델링하였다. 궤환함수로 구성된 리아푸노프 함수를 이용하여 사이버공격에도 강인한 샘플치제어기 설계 조건을 선형행렬부등식의 형태로 유도하였고, 이에 대한 효용성을 수치예제를 통하여 증명하였다.

References

- [1] J. Lee, B. Bagheri, H.-A. Kao, "A Cyber-physical Systems Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems," *Journal of Manufacturing Letters*, Vol. 3, pp. 18-23, 2015.
- [2] R. Rajkumar, I. Lee, L. Sha, J. Stankovic, "Cyber-physical Systems: The Next Computing Revolution," *Proceedings of IEEE Conference on Design Automation Conference*, pp. 731-736, 2010.
- [3] K. Liu, E. Fridman, "Wirtinger's Inequality and Lyapunov-based Sampled-data Stabilization," *Journal of Automatica*, Vol. 48, pp. 102-108, 2012.
- [4] T.H. Lee, Z.G. Wu, J.H. Park, "Synchronization of a Complex Dynamical Network With Coupling Time-varying Delays via Sampled-data Control," *Journal of Applied Mathematics and Computation*, Vol. 219, No. 3, pp. 1354-1366, 2012.
- [5] T.H. Lee, J.H. Park, "Stability Analysis of Sampled-data Systems via Free-matrix-based Time-dependent Discontinuous Lyapunov Approach," *Journal of IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 62, pp. 3653-3657, 2017.
- [6] A. Seuret, C. Briat, "Stability Analysis of Uncertain Sampled-data Systems With Incremental Delay Using Looped-functionals," *Journal of Automatica*, Vol. 55, pp. 274-278, 2015.
- [7] H.B. Zeng, K.L. Teo, Y. He, "A New Looped-functional for Stability Analysis of Sampled-data Systems," *Journal of Automatica*, Vol. 82, pp. 328-331, 2017.
- [8] B. Castillo, S. Di Gennaro, S. Monaco, D. Normand-Cyrot, "On Regulation Under Sampling", *Journal of IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 42, pp. 864-868, 1997.
- [9] D. Dochain, G. Bastin, "Adaptive Identification and Control Algorithms for Nonlinear Bacterial Growth Systems," *Journal of Automatica*, Vol. 20, pp. 621-634, 1984.
- [10] Y. Mikheev, V. Sobolev, E. Fridman, "Asymptotic Analysis of Digital Control Systems," *Journal of Automatic Remote Control*, Vol. 49, pp. 1175-1180, 1988.
- [11] H. Zhang, P. Cheng, L. Shi, J. Chen, "Optimal Denial-of-service Attack Scheduling With Energy Constraint," *Journal of IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 60, pp. 3023-3028, 2015.
- [12] Z. Wang, D. Wang, B. Shen, F. Alsaadi, "Centralized Security-guaranteed Filtering in Multirate-sensor Fusion Under Deception Attacks," *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 355, pp. 406 - 420, 2018.
- [13] D. Ding, Q. Han, Y. Xiang, X. Ge, X. Zhang, "A Survey on Security Control and Attack Detection for Industrial Cyber-physical Systems," *Journal of Neurocomputing*, Vol. 275, pp. 1674-1683, 2018.
- [14] Y. Sun, G. Yang, "Periodic Event-triggered Resilient Control for Cyber-physical Systems Under Denial-of-Service Attacks," *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 355, No. 13, pp. 5613-5631, 2018.
- [15] T. Lee, J. Park, "Design of Sampled-data controllers for the Synchronization of Complex Dynamical Networks Under Controller Attacks," *Journal of Advances in Difference Equations*, Vol. 184, pp. 1-15, 2019.
- [16] H. Gao, J. Wu, P. Shi, "Robust Sampled-data H_∞ Control With Stochastic Sampling," *Journal of Automatica*, Vol. 45, pp. 1729-1736, 2009.

TaeHee Lee (이 태 희)



He received the Ph.D. degree in electrical engineering from Yeungnam University, South Korea, in 2015. He began with Chonbuk National University, South Korea, in 2017, where he is currently an Assistant Professor.
Email: thlee@jbnu.ac.kr