

## 지연된 다중 입력을 갖는 시스템을 안정화하는 출력 궤환 예측 제어

# An Output Feedback Predictive Control for Stabilizing a System With Multiple Delayed Inputs

양 장 훈

서울미디어대학원대학교 뉴미디어학부

Janghoon Yang

Department of New Media, Seoul Media Institute of Technology, Seoul 07590, Korea

### [요 약]

5G의 상용화 등 네트워킹 기술의 발전은 다양한 시스템들이 네트워크를 통해서 정보를 교환하고 제어할 수 있는 기반을 제공하고 있다. 또한, 네트워크에서 발생하는 많은 현상들은 정보의 지연과 관련되기 때문에 지연된 정보를 갖는 시스템의 제어의 중요성이 증가하고 있다. 본 논문에서는 최근들어 지연이 있을 때에 저복잡도 제어기 설계에 많이 활용되는 예측 제어를 도입하여, 지연된 다중 입력을 갖는 시스템에서 지연의 크기와 입력의 수에 상관없이 거의 일정한 복잡도를 갖는 예측 제어기를 제시한다. 또한, 출력 궤환 구조를 갖는 예측 제어기가 점근적 수렴이 보장됨을 증명한다. 모의 실험을 통해서 제안된 방식이 상태 벡터를 확장한 전통적인 방식이나, 다른 예측 기반 제어 방식에 비해 적은 복잡도를 가지면서 안정성을 보장하는 제어기 설계 성공이 높게 발생함을 확인하였다.

### [Abstract]

The evolution of networking technology such as commercialization of 5G systems provides foundation for information exchange and control of systems over the network. In addition, importance of controlling a system with delay is increasing significantly, since various phenomena in the network are associated with delay. In this paper, with a predictive control which has been studied for designing a controller with low complexity, we propose a novel predictive control for a system with multi-inputs such that it can keep the complexity almost the same regardless of the number of inputs and degree of delay. The asymptotic stability of the proposed control with a static output feedback is also proved. The numerical simulation shows that the proposed method is superior in complexity and the performance of finding feasible controllers to the existing predictive control and a conventional method based on augmented states.

**Key word** : Delay, Linear matrix inequality, Networked control system, Output feedback control, Predictive control.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.5.424>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 3 September 2019; Revised 4 October 2019

Accepted (Publication) 26 October 2019 (30 October 2019)

\*Corresponding Author; Janghoon Yang

Tel: +82-2-6393-3237

E-mail: [jhyang@smit.ac.kr](mailto:jhyang@smit.ac.kr)

## 1. 서론

다양한 네트워킹 기술의 발달에 따라서, 이전에 연결되지 않았던 다양한 디바이스들이 네트워크를 통해 연결되고 있다. 또한 이런 다양한 디바이스들을 통하여 정보를 수집할 뿐만 아니라 개별의 디바이스를 제어하거나 많은 다수의 디바이스들이 네트워크를 통해서 연결되어 하나의 시스템으로 동작하고 있다. 이런 배경을 바탕으로 네트워크 기반 제어 시스템에 대한 연구가 1990년대부터 지금까지 활발하게 진행되고 있다 [1]. 또한, 저지연, 초고속, 초연결을 추구하는 새로운 광대역 무선 통신 규격인 5G는 스마트 팩토리, 자율 주행 자동차, 무인 비행체 등과 융합되어 새로운 혁신적인 서비스로 진화하고 있으며, 이는 빠르고 정확하게 네트워크를 통해서 안정적으로 제어할 수 있는 기술에 심화를 요청하고 있다 [2].

네트워크 기반 제어에서는 기존의 전통적인 제어에서 발생하지 않은 다양한 현상들이 네트워크의 특성에 의해서 발생된다 [3]. 먼저 여러 경로를 통해서 정보가 전달될 때에 경로가 고정되지 않고 다양한 경로를 가질 수 있다. 즉, 정보 전달의 경로 선택에 따라서 정보 전달에 걸리는 시간이 달라진다. 또한, 동일한 경로로 전달되더라도, 해당 전송 구간의 혼잡도에 따라서 전송 속도가 달라진다. 또한, 무선 구간에서는 유선 구간과 달리 전송에 따른, 패킷의 손실이 발생할 수 있고 이로 인해 정보의 전달 순서가 뒤바뀌거나 재전송으로 인한 추가적인 지연이 발생할 수 있다. 따라서, 네트워크에서 발생하는 다양한 정보의 지연은 네트워크 기반 제어 시스템의 설계에서 중요한 역할을 차지하게 된다.

지연을 고려한 제어 시스템의 설계는 전통 제어에서도 다양한 물리적인 환경을 고려하여 모델링이 되었다. 실제 입력을 가하면 물리적인 성질에 의해서 바로 입력이 원하는 곳에 전달되지 않고 지연이 발생하고 이러한 현상을 고려하여 지연이 있을 때에 시스템의 안정적인 제어에 대한 다양한 연구가 수행되었다. 하지만, 많은 연구들이 물리적인 시스템을 다루는 연속 시간 시스템에서의 연구들이 주를 이루고 이 때에 시스템의 안정성을 보장하는 방법으로 리아푸노프 안정성 조건을 확장한 리아푸노프-크라소프스키 (Lyapunov-Krasovskii) 방법이나 람주미힌 (Razumikhin) 방법을 기초로 하여 제어기를 설계하는 연구들이 다수를 차지하고 있다 [4],[5],[6].

네트워크를 통해서 발생하는 많은 지연은 제어시스템의 제어 입력 지연과 관련된다. 네트워크 상에서 지연이 시간에 따라서 변할 때에 지연의 경계값을 폴리토프 불확실성으로 변환하여 선형 행렬 부등식으로 보수적인 충분 조건이 유도되었다 [7]. 제어기를 중심으로 센서와 구동부 사이에 각각의 독립적인 채널이 존재하는 경우에 서로 다른 불규칙한 지연에 의해서 순서가 뒤바뀌는 상황을 정확히 모델링하고, 실수 조건 (Jordan) 행렬 형태를 이용하여 불확실한 파라미터 수를 줄임으로써 보다 덜 보수적인 선형 행렬 부등식에 기반한 안정성을 위한 충분 조건이 제시되었다 [8]. 보다 현실적인 시스템을 고려하기 위해

서 디지털 채널에서 발생하는 양자화 오류와 지연에 의한 시스템의 불확실성을 동시에 고려하여 강건 상태 궤환 제어기가 설계되었다 [9].

지연이 있을 때의 또 다른 제어기 설계의 방향 중에 하나는 예측 제어 방법이다. 이 방법은 예측 기반의 변환을 통해서 제어기를 구하기 용이한 형태로 바꾸어서 제어기를 구하는 방법으로서 주로 연속시간 시스템에서의 제어에 대한 연구가 수행되었다. [11],[12]. 분산 입력 지연을 갖는 시스템에서 상태정보의 변환을 통해서 지수적 안정성을 보장하는 선형 예측 궤환 제어 방식이 증명되었다 [13]. 또한, 연속시간 시스템에서 시변 입력 지연을 갖는 시스템에 대한 예측 궤환 제어 설계 방식이 제안되었고 [14], 시스템 파라미터와 지연에서의 불확실성에 강인한 예측 궤환 방법으로 아르스타인 시스템 변환 방법이 사용되었다 [15].

기존의 연구는 대부분 단일 입력이 단일 지연을 갖는 경우나 단일 입력이 다중 지연을 갖는 시스템, 또는 연속 시간에서 입력이 지연을 갖는 시스템 제어에 대한 연구가 대부분이다. 본 논문에서는 지연된 다중 입력을 갖는 시스템에서 예측 제어 방식을 도입하여 저복잡도를 가지고 제어기를 설계한다. [10]에서도 유사한 시스템 구성에 대한 예측 제어기가 제안되었으나, 입력의 수에 따라서 복잡도가 크게 증가하는 한계를 가지고 있어서, 이를 해결하는 다른 형태의 예측 제어기 설계를 제시하고, 복잡도와 성능을 모의 실험을 통해서 확인한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 이 논문에서 고려하는 시스템 모델을 제시하고 기존의 상태 정보를 확장한 전통적인 제어기 설계 방식을 설명한다. 3장에서는 지연의 크기와 입력의 수에 관계없이 복잡도가 거의 일정하게 유지되는 고정형 출력 제한 예측 제어기를 설계하고, 4장에서 모의 실험을 통해서 기존 방식과 성능과 복잡도를 비교한다. 5장에서는 결론과 향후 연구에 대해서 간략히 제시한다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는  $N$ 개의 다중 입력 지연이 있는 시불변 이산 시간 선형 제어 시스템을 고려한다.  $k$ 번째 이산 시점에서의 시스템은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + \sum_{i=1}^N B_i u_i(k-r_i) \\ y_i(k) &= C_i x(k) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $x(k) \in \mathbb{R}^n$  는 시스템의 상태,  $u_i(k) \in \mathbb{R}^m$  와  $y_i(k) \in \mathbb{R}^p$  는  $i$  번째 제어 입력과 시스템 출력이고,  $A, B, C$ , 는 각 변수의 차원에 따라서 적절하게 정의되는 시스템을 정의하는 상수 행렬이다.  $r_i$  는  $i$  번째 입력의 지연으로 정수값을 가지고, 최대 크기는  $d_{\max}$  이면서  $r_1 < r_2 < \dots < r_N$  을 가정한다.

이 가정은 수식의 편이를 위한 가정이기 때문에 이 가정이 성립되지 않는 경우에는 적절히 수식을 바꾸어 적용 가능하다.

시스템에 지연이 있을 때에 상태 신호를 확장하여 제어 이득  $\bar{K} = [K_1, K_2, \dots, K_N]$  는  $P > 0$  을 만족하면서 다음 선형 행렬 부등식을 만족하도록 설계된다[16].

$$\bar{A}(\bar{K})^T P \bar{A}(\bar{K}) - P < 0 \tag{2}$$

여기서  $\bar{A}(\bar{K}) \in R^{(r_N+1)n \times (r_N+1)n}$  는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{A}(\bar{K}) = \begin{bmatrix} 0 & I_{r_N n} \\ B_N K_N C_N & \hat{A}(\bar{K}) \end{bmatrix} \tag{3}$$

위 식에서  $I_a$  는  $a \times a$  의 크기를 갖는 항등행렬이고,  $\hat{A}(\bar{K})$  의  $n \times n$  의 크기를 갖는  $j$  번째 서브블록 행렬인  $[\hat{A}(\bar{K})]_j$  는 다음과 같이 정의된다.

$$[\hat{A}(\bar{K})]_j = \begin{cases} A, & \text{if } j = r_N \\ B_i K_i C_i, & \text{else if } j = r_N - r_i \\ 0, & \text{else} \end{cases} \tag{4}$$

(2)로부터 상태를 확장하여 지연이 있을 때에 제어기 이득을 구하는 방식은 지연의 크기가 증가하면서 제한 조건식의 크기가 증가하여 복잡도가 크게 증가하는 방식임을 확인할 수 있다. 이를 해결하기 위해서 [10]에서 수식 변환을 이용한 예측 제어 방식이 제안되어서  $N$ 이 작을 때에 저복잡도를 갖으면서 보다 우수한 성능을 갖는 제어기 설계 방식이 제시되었으나, 입력의 수가 증가하면서, 복잡도가 기존 방식과 유사한 수준으로 증가하는 현상이 발생하였다. 본 논문에서는 이를 해결하는 또 다른 예측 제어 방식을 개발함으로써 입력수 증가에 따른 복잡도 증가 상대적으로 적으면서 유사한 성능을 갖는 방식을 제안한다.

### III. 고정형 출력 제한 예측 제어기

예측 제어를 설계하는 방법으로 많이 쓰이는 방식은 새로운 예측 변수를 도입하여 예측 변수의 안정성을 보장하는 제어를 설계하고, 예측 변수의 안정성이 원래 상태 정보의 안정성을 보장하는 것을 보이는 것이다. 이를 위해서 수식 (1)을 벡터를 이용한 단일 지연 입력 벡터를 갖는 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x(k+1) = Ax(k) + \bar{B}u(k-r_N) \tag{5}$$

위 식에서  $\bar{B} = [B_1, B_2, \dots, B_N]$  이고  $\bar{u}(k-r_N) = [u_1(k-r_1)^T, u_2(k-r_2)^T, \dots, u_N(k-r_N)^T]^T$  이다. (5)의 수식을 이용하여 변

환된 새로운 신호  $z(k)$  를 다음과 같이 정의한다.

$$z(k) = x(k) + \sum_{j=1}^{r_N} A^{j-r_N-1} \bar{B}u(k-j) \tag{6}$$

식(5)과 식(6) 을 이용하여  $x(k+1)$  은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$z(k+1) = Ax(k) + \bar{B}u(k-r_N) + \sum_{j=1}^{r_N} A^{j-r_N-1} \bar{B}u(k+1-j) \tag{7}$$

식(6)을  $x(k)$  에 관한 식으로 정리 후 식(7)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$z(k+1) = Az(k) + \bar{B}u(k-r_N) + \sum_{j=1}^{r_N} A^{j-r_N-1} \bar{B}u(k+1-j) - \sum_{j=1}^{r_N} A^{j-r_N} \bar{B}u(k-j) \tag{8}$$

식 (8)에서 뒤에 두 개의 합 요소에 대해서 동일한 성분들을 상쇄시킨 후에 정리하면 다음과 같은 간략한 식으로 표현된다.

$$z(k+1) = Az(k) + A^{-r_N} \bar{B}u(k) \tag{9}$$

식(9)는 제어 입력이  $\bar{u}(k)$  인  $z(k)$  에 대한 상태 방정식으로 해석될 수 있고 출력 제한 제어 형태를 갖기 위해서  $\bar{u}(k)$  를 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{u}(k) = \bar{K}z(k) \tag{10}$$

위 식에서  $\bar{K}$  는  $K_i$  가 대각에 위치하면서 나머지 부행렬은 0인 행렬이고,  $\bar{C} = [C_1^T, C_2^T, \dots, C_N^T]^T$  이다. (10)을 (9)에 넣어 정리하면 제한에 의한  $z(k)$  의 방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$z(k+1) = (A + A^{-r_N} (\sum_{i=1}^N B_i K_i C_i)) z(k) \tag{11}$$

또한, 식(10)에 (6)을 삽입하여 정리하면 실제 출력과 과거입력으로서 현재 제어 입력이 결정되는 형태의 식이 유도된다.

$$\bar{u}(k) = \bar{K}Cz(k) + \bar{K}C \sum_{j=1}^{r_N} A^{j-r_N-1} \bar{B}u(k-j) \tag{12}$$

식(5)에서 실제  $k$  시점에 사용되는 제어 입력은  $\bar{u}(k-r_N)$  이고 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{u}(k-r_N) = \begin{bmatrix} K_1 y_1(k-r_N) \\ K_2 y_2(k-r_N) \\ \vdots \\ K_N y_N(k-r_N) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 C_1 \\ K_2 C_2 \\ \vdots \\ K_N C_N \end{bmatrix} \sum_{j=1}^{r_N} A^{j-r_N-1} \bar{B} u(k-j) \quad (13)$$

위 식에서  $i$  번째 입력은  $r_i$  만큼 지연된 시스템 출력이 아닌  $r_N$  만큼 지연된 시스템 출력을 사용하기 때문에 제안 방식은 더 과거 정보를 사용하기 때문에 이에 의한 최적의 성능에 미치지 못할 수 있으며 이를 개선하는 추후 연구가 부가적으로 필요하다. 하지만,  $k$  시점에는 각 입력이 사용하는 시스템 출력이 확보되기 때문에 구현 가능한 입력을 갖는다.

제어 입력  $\bar{u}(k-r_N)$ 는 변환된 상태인  $z(k)$ 에 대해서 설계되었기 때문에 동일한 제어 입력에 대해서 원래 시스템 상태인  $x(k)$ 가 안정성을 확보하는지에 대한 확인이 필요하고, 다음 정리는 실제 이것이 가능함을 보인다.

**정리-1.** : 식(13)에 의해서 식(6)에서 정의된 변환된 상태인  $z(k)$ 가 점근적 안정성을 갖으면, 원래 상태인  $x(k)$ 의 점근적 안정성도 보장된다. 또한 다음 선형 부등식을 만족하는  $\hat{K}$ 와  $\hat{P} > 0$ 의 존재는  $x(k)$ 의 점근적 안정성을 보장한다.

$$(A + A^{-r_N} \hat{B} \hat{K} C)^T \hat{P} (A + A^{-r_N} \hat{B} \hat{K} C) - \hat{P} < 0 \quad (14)$$

**증명 :** 식(6)에 삼각 부등식을 적용하면 다음과 같다.

$$\|x(k)\| \leq \|z(k)\| + \sum_{j=1}^{r_N} \lambda_{\max}(A^{j-r_N-1} \bar{B}) \|\bar{u}(k-j)\| \quad (15)$$

여기서  $\lambda_{\max}()$ 는 괄호안에 들어가는 행렬의 절대 고유값의 최대치를 계산하는 함수이고  $\|b\|$ 는 벡터  $b$ 의 2-norm이다. 리아푸노프 안정성 조건에 의해서 (14)를 만족하는  $\hat{K}$ 와  $\hat{P} > 0$ 가 존재할 때에  $z(k)$ 의 점근적인 안정성이 보장된다. 즉  $k \rightarrow \infty$ 면,  $\|z(k)\| \rightarrow 0$ 이고, 식(10)에 의해서  $\|u(k)\| \rightarrow 0$ 이다. 따라서,  $k \rightarrow \infty$ 이면 식(14)의 오른쪽 항이 모두 0으로 수렴하기 때문에  $\|x(k)\|$ 도 0으로 수렴하고  $x(k)$ 의 점근적 안정성이 확보된다. 기존의 확장된 상태를 기반으로 한 제어 입력의 설계와 달리 식(14)에서 부등식 제한 조건은  $N$ 이나  $r_N$ 에 상관없이 오직 원래 상태 벡터의 크기에 의해서 결정됨을 확인할 수 있다.

#### IV. 모의실험

제안 방식의 성능과 복잡도를 확인하기 위해서 모의실험을 진행하였다.  $n, m, p$ 는 모두 2로 설정하고  $A, B, C_i$ 의 모든 요소는 표준 정규 분포에 따라서 독립적으로 발생시켰다.  $r_i$ 는 크기 조건을 만족하면서  $d_{\max}$  내에서 균일 분포에 따라서  $N$ 개를 선택하는 형태로 발생시켰다. 또한 (2)나 (14)의 부등식은 선형

부등식이 아니기 때문에 이를 선형화하여 근사적으로 풀어내는 [16]의 Cone Complementary 선형화 알고리즘을 이용하여 해를 구하였다. 이 알고리즘의 최대 회기적 반복 횟수는 10으로 고정하였으며, 동일한 시스템 구성에 대해서 500번 시스템 행렬을 발생 시켜서 해당 구성에서의 성능을 구하였다.

그림-1에서는 최대 지연  $d_{\max}$ 가 증가하면서 시스템을 안정화시키는 제어기를 찾는 비율을 표시하고 있다. 모든 방식에서 지연이 증가하면서 찾는 비율이 감소하나, 상대적으로 기존 방식에서 감소정도가 크다. 또한, 제안 방식은 [10]에 비해서 우수한 성능을 보이는데, [10]에서는 입력수 만큼의 제한조건을 만족해야하지만, 제안 방식에서는 (14)에서와 같이 하나의 조건만 만족하면 되기 때문에 성능이 더 우수하게 발생한 것으로 추정된다. 그림-2에서는 동일한 모의 실험 환경에서 제어기를 구하는데 소요되는 평균적인 시간(초)을 도시하고 있다. 지연의 크기에 비례하여 복잡도가 증가하는 기존 방식에서는 최대 지연이 증가하면서 복잡도가 크게 증가하는 반면에 [10]과 제안 방식에서의 복잡도는 거의 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다. 또한 [10]과 비교시 제안 방식은 하나의 선형 부등식 조건에 대해서 만족하는 해를 찾는 형태로 조건이 주어지기 때문에 [10]에 비해서 상대적으로 작은 복잡도를 갖는 것이 확인된다.

그림-3에서는 제어 입력의 증가에 따른 안정성을 보장하는 제어기 설계 성공 비율을 도시하였다. 예상대로 제어 입력의 수가 증가하면서 성공 비율도 증가하고, 제안 방식은 세 개 이상의 제어 입력을 갖는 경우에 거의 항상 안정성을 보장하는 제어기의 계산이 가능함을 확인할 수 있다. 하지만, [10]에서는 입력의 수가 증가하더라도 성공 비율의 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있는데 이는 입력의 개수가 증가하면서 제한 조건의 개수가 증가하는 설계의 특징에 기인한 것으로 파악된다. 또한, 기존 방식도 큰 폭으로 성공 확률이 증가하지만, 제안 방식에 비해서는 현저하게 성공 비율이 낮음을 확인할 수 있다. 그림-4에서는 동일한 모의 실험 환경에서 제어 이득을 계산하는데 소요되는 복잡도를 평균 시간으로 보여주고 있다. 기존 방식은 제어 입력의 수가 증가하면서 큰 지연을 갖는 입력이 더 자주 발생하고 이로 인해 복잡도가 증가한다. 따라서, 상대적인 복잡도의 증가가 크지 않고, 입력의 수가 2에서 6으로 증가할 때에 연산 시간은 2배 정도 증가한 것을 관찰할 수 있다. 반면에 [10]의 알고리즘은 입력의 수가 증가하면 조합의 수가 증가하고 이로 인해서 선형적인 증가보다 높은 속도로 복잡도가 증가한다. 기존 알고리즘에 비해서 여전히 복잡도가 작으나, 입력의 수가 2에서 6으로 증가하면서 상대적인 증가폭은 수십배에 이르는 것을 확인할 수 있다. 반면에 제안 알고리즘은 입력의 수가 증가하더라도 동일한 수의 제한조건에 대해서 최적화 해를 구하기 때문에 거의 복잡도에 변화가 없음을 확인할 수 있다.

#### V. 결론

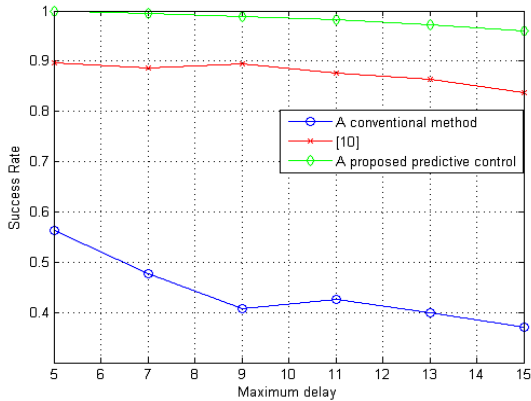


그림 1. 최대 지연 증가에 따른 안정적 제어기 설계의 성공률  
 Fig. 1. Success rate of finding a stabilizing controller for increasing maximum delay.

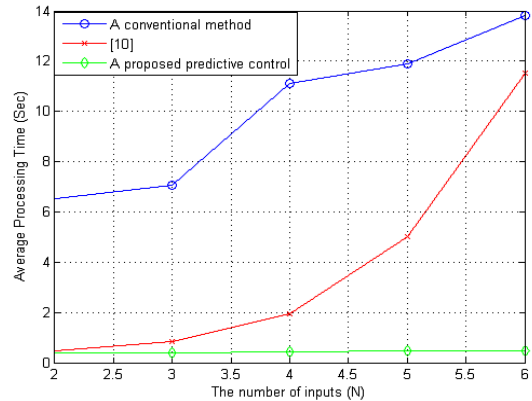


그림 4. 제어 입력 증가에 따른 안정적 제어기 설계의 연산 처리 시간  
 Fig. 4. Success rate for finding a stabilizing controller for the increasing number of control inputs.

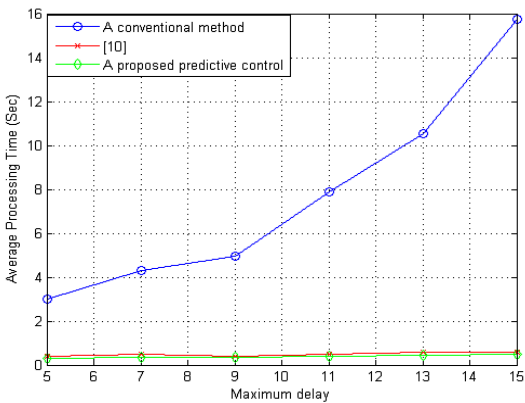


그림 2. 최대 지연 증가에 따른 안정적 제어기 설계의 연산 처리 시간  
 Fig. 2. Processing time for finding a stabilizing controller for increasing maximum delay.

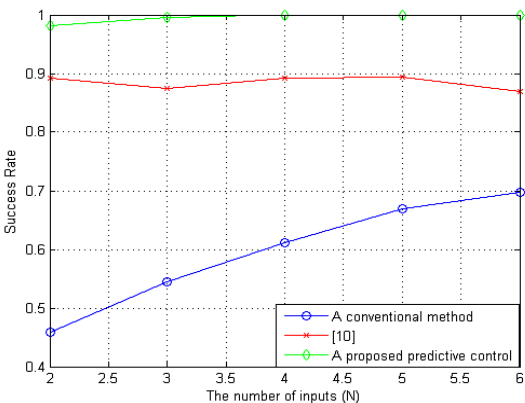


그림 3. 제어 입력 증가에 따른 안정적 제어기 설계의 성공률  
 Fig. 3. Success rate for finding a stabilizing controller for the increasing number of control inputs.

본 논문에서는 다중 지연 입력을 갖는 이산 시간 제어 시스템에서 안정성을 보장하는 예측 제어 기반의 고정형 출력 제어기 설계 방법을 제시하였다. 제안된 설계 방법은 선형 행렬 부등식의 해로 존재하고, 지연의 독립적인 복잡도를 갖기 때문에 지연이 있는 제어 시스템에서 저복잡도 제어기 설계에 있어서 유용한 방법임을 이론적으로 확인하였다. 또한, 모의 실험을 통하여 제안 방법은 실제 평균 연산 시간이 기존 방법에 비해서 작으면서 안정성을 보장하는 제어기를 구하는데 있어서 가장 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

본 연구는 예측 제어를 기반으로 지연을 갖는 다중 입력에 대한 안정성만을 고려한 연구로서 이를 기반으로 다양한 후속 연구가 요청된다. 먼저, 시스템 잡음이나 측정 잡음이 있을 때에 평균 제곱 안정성 관점에서의 제어기 설계를 필요로 한다. 이를 더 확장하면, 특정 기준에 의한 제어 성능을 보장하는 제어기를 예측 제어를 기반으로 설계하는 방법은 제안 방법을 단순히 적용할 수 없다. 예를들어, 선형 이차 가우시안 제어를 예측 제어를 기반으로 할 경우에는 기존의 분리 법칙에 따른 칼만 필터와 선형 2차 조정기와 어떤 연관성과 차이점을 갖을 수 있는지에 대한 연구가 필요하다. 또한, 제어 입력의 지연뿐 아니라 시스템 상태 정보에 있어서의 지연이 동시에 존재하는 시스템에 대한 안정성을 보장하는 예측 기반 제어 설계에서도 제안 방식이 확장될 수 있을 것으로 예상된다.

### Acknowledgement

이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: NRF-2017R1A2B4007398)



## References

- [1] E. G. W. Peters, D. E. Quevedo, and M. Fu, "Controller and scheduler codesign for feedback control over IEEE 802.15.4 networks," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 24, No. 6, pp. 2016-2030, Nov. 2016.
- [2] F. Voigtlander, A. Ramadan, J. Eichinger, C. Lenz, D. Pensky, A. Knoll, "5G for robotics: ultra-low latency control of distributed robotic systems," in *Proceeding of International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC)*, Budapest: Hungary, pp. 69-72, Oct. 2017.
- [3] L. Schenato, B. Sinopoli, M. Francescheti, K. Poolla, and S. S. Sastry, "Foundations of control and estimation over lossy networks," *Proceedings of IEEE*, Vol. 95, No. 1, pp.163-187, Jan. 2007.
- [4] E. Fridman, "Tutorial on Lyapunov-based methods for time-delay systems," *European Journal of Control*, Vol. 20, pp. 271-283, 2014.
- [5] E. Fridman, "Stability of linear descriptor systems with delay: a Lyapunov-based approach," *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Vol. 273, No. 1, pp.24-44, Sep. 2002.
- [6] M. Wu, Y. Hea, J. She, and G. Liu, "Delay-dependent criteria for robust stability of time-varying delay systems," *Automatica*, Vol. 40, No. 8, pp. 1435-1439, Aug. 2004.
- [7] M. Cloosterman, N. van de Wouw, M. Heemels, and H. Nijmeijer, "Robust stability of networked control systems with time-varying network-induced delays," in *Proceeding of IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego: CA, pp.4980-4985, Dec. 2006.
- [8] M. Cloosterman, N. van de Wouw, W.P.M.H. Heemels, and H. Nijmeijer, "Stability of networked control systems with large delays," in *Proceeding of IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans: LA, pp.5017-5022, Dec. 2007.
- [9] F. Rasool, and S. K. Nguang, "Quantized robust  $H_\infty$  control of discrete-time systems with random communication delays," *Journal International Journal of Systems Science*, Vol. 42, No. 1, pp. 129-138, Jan. 2011.
- [10] J. Yang, "A static output feedback predictive control for a system with multiple input delays," in *Proceeding of International Conference on Instrumentation, Control, and Automation*, Bandung: Indonesia, pp.1-5, July-Aug. 2019.
- [11] B. Zhou, and Z. Lin, "Truncated predictor feedback stabilization of polynomially unstable linear systems with multiple time-varying input delays," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 59, No. 8, pp. 2157 - 2163, Aug. 2014.
- [12] A. Ponomarev, "Nonlinear predictor feedback for input-affine systems with distributed input delays," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 61, No. 9, pp. 2591 - 2596, Sept. 2016.
- [13] N. Bekiaris-Liberis, and M. Krstic, "Lyapunov stability of linear predictor feedback for distributed input delays," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 56, No. 3, pp. 655 - 660, Mar. 2011.
- [14] S. Y. Yoon, and Z. Lin, "Truncated predictor feedback control for exponentially unstable linear systems with time-varying input delay," *Systems & Control Letters*, Vol. 62, No. 10, pp. 837-844, Oct. 2013.
- [15] A. Ponomarev, "Reduction-based robustness analysis of linear predictor feedback for distributed input delays," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 61, No. 2, pp. 468 - 472, Feb. 2016.
- [16] L. E. Ghaoui, F. Oustry, and M. AitRami, "A cone complementarity linearization algorithm for static output-feedback and related problems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 42, No. 8, pp. 1171-1176, Aug. 1997.



**양 장 훈 (Janghoon Yang)**

2006년 8월 : University of Southern California, Department of Electrical Engineering (공학박사)

2010년 3월 ~ 현재 : 서울미디어대학원대학교 뉴미디어학부 부교수

※ 관심분야 : 제어, 통신, 감성, 콘텐츠