

## 무선 채널을 활용한 제어 신호 컴퓨팅

정민규<sup>1</sup> · 박관근<sup>2\*</sup>

### Control Signal Computation using Wireless Channel

Mingyu Jung<sup>1</sup> · Pangun Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134 Korea

<sup>2\*</sup>Associate Professor, Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134 Korea

#### 요 약

무선 기반 제어 시스템에서 안정성을 보장하기 위한 일반적인 설계 방식은 제어기가 무선채널을 통하여 개별 센서 값을 수신한 다음 계산된 제어신호를 액추에이터로 전송한다. 본 논문에서는 플랜트의 모든 센서가 동시에 스케일링된 신호를 액추에이터로 전송한 후, 액추에이터가 수신된 신호를 추가적으로 스케일링하여 피드백 제어신호를 계산할 수 있는 Over-the-air controller 기법을 제안한다. 이러한 제어신호 컴퓨팅 기법은 기본적으로 Over-the-air computation 기술을 적용하여 무선 제어 시스템의 제어신호를 무선채널을 통하여 계산한다. 일반적인 센서-제어기-액추에이터 통신 방식과 대조적으로, Over-the-air controller는 다중 액세스 무선채널의 중첩 속성을 활용하여 단일 통신 자원에서 다수 센싱 신호의 통신 및 컴퓨팅을 완료한다. 따라서 제안된 기법은 전용 제어기가 필요하지 않은 단순한 네트워크 구조로 피드백 지연시간 및 무선 자원 사용률을 개선시킬 수 있다.

#### ABSTRACT

To stabilize closed-loop wireless control systems, the state-of-the-art approach receives the individual sensor measurements at the controller and then sends the computed control signal to the actuators. We propose an over-the-air controller scheme where all sensors attached to the plant transmit scaled sensing signals simultaneously to the actuator, and the actuator then computes the feedback control signal by scaling the received signal. The over-the-air controller essentially adopts the over-the-air computation concept to compute the control signal for closed-loop wireless control systems. In contrast to the state-of-the-art sensor-to-controller and controller-to-actuator communication approach, the over-the-air controller exploits the superposition properties of multiple-access wireless channels to complete the communication and computation of a large number of sensing signals in a single communication resource unit. Therefore, the proposed scheme can obtain significant benefits in terms of low actuation delay and low resource utilization with a simple network architecture that does not require a dedicated controller.

**키워드** : 오버-디-에어 컴퓨테이션, 무선 통신, 무선 채널, 네트워크제어시스템

**Keywords** : Over-the-air computation, Wireless communication, Wireless channel, Networked control systems

Received 15 June 2021, Revised 16 June 2021, Accepted 24 June 2021

\* Corresponding Author Pangun Park(E-mail:pgpark@cnu.ac.kr, Tel:+82-42-821-6862)

Associate Professor, Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.7.986>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© 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.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

최근 무선 네트워크 기술은 공장 자동화 및 전력 분배 시스템 같은 크리티컬한 제어 인프라 시설의 핵심적인 요소 기술이 되고 있다 [1,2]. 무선 네트워크 기반 제어 시스템 (WNCS; Wireless Networked Control Systems) 은 분산된 센서, 제어기 및 액추에이터 간 센싱 정보 및 제어신호를 무선 네트워크를 통하여 전달하고, 이에 기반하여 제어 시스템의 성능을 보장하고자한다 [1]. WNCS는 노드결합, 지연 및 신뢰성과 같은 무선 네트워크 성능 뿐 만 아니라, 플랜트 내 물리적 역학 간의 복잡한 상호작용으로 인하여, 기존의 분산 시스템과 근본적으로 다르다.

일반적인 WNCS 구조는 많은 센서 노드가 플랜트의 상태를 샘플링 한 다음 각 센서가 제어기로 각 샘플 정보를 송신한다. 모든 센서 데이터가 도착하면 제어기는 제어신호를 계산하여 액추에이터로 전송한다. 센싱 정보 및 제어신호의 지연 및 손실은 전체 제어 시스템의 안정성 및 성능을 저하시킬 수 있다 [2,3]. 또한, 최근 센서 및 임베디드 컴퓨팅 기술의 발전으로 무선 센서 노드의 수가 급증하고 있으며, 이는 센싱 정보를 수집하는데 더 많은 무선 자원이 필요함을 의미한다. 이러한 WNCS의 도전과제를 해결하기 위한 무선 제어 시스템에 새로운 통신 구조 및 프로토콜이 필요하다 [1,4].

최근 통신 시스템 관련 연구에서는 다중 액세스 채널의 중첩 특성을 활용하여 센싱 데이터의 선형 함수를 효율적으로 계산하기 위한 Over-the-air computation이 제안되었다 [5,6,7]. 이러한 무선채널을 활용한 컴퓨팅 패러다임에 대한 응용 분야로서, 본 논문에서는 제어기 설계 방안 중 하나인 선형 피드백 제어신호가 플랜트 센싱 값의 가중 합계 형태라는 것을 인지하고, Over-the-air computation 기술을 제어신호의 계산에 적용하고자 한다 [8].

본 논문에서는 무선 제어 시스템의 제어신호를 계산하기 위하여 Over-the-air computation 기술을 활용한 AirCont(Over-the-Air Controller) 기법을 제안한다. AirCont는 다중 액세스 채널을 사용하여 센서 데이터의 가중 합계를 계산함으로써, 다수의 센서와 액추에이터 간 직접 통신 구조를 적용할 수 있다. 이는 센서-제어기-액추에이터의 형태를 갖는 일반적인 제어 시스템의 네트워크 구조를 근본적으로 변화시킨다. 본 연구에서는

제안된 AirCont 기술의 달성 가능한 제어 안정성과 제어신호의 컴퓨팅 오차 값을 분석한다. 시뮬레이션 결과를 통하여, AirCont가 제어 시스템의 안정영역을 확장시키고, 기존 방식에 비하여 제어신호의 컴퓨팅 오차를 줄인다는 것을 보여준다.

## II. 시스템 모델

본 장에서는 AirCont 시스템 모델과 일반적인 무선 네트워크 기반 제어 시스템의 차이점을 설명한다.

### 2.1. 제어 시스템 모델

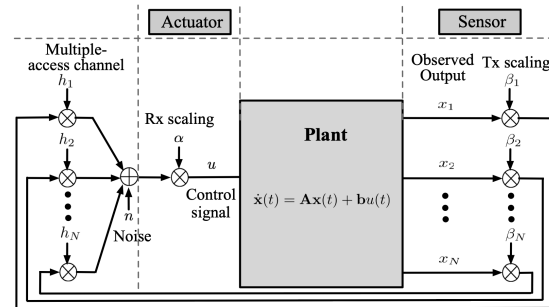


Fig. 1 Over-the-air controller for closed-loop wireless control systems.

본 논문은 그림 1과 같이 페루프 제어 시스템 내 플랜트를  $N$ 개의 무선 센서가 모니터링하고, 제어신호가 단일 액추에이터로 전달되는 시스템을 고려한다. 각 센서가 플랜트의 상태 정보를 측정하므로 플랜트의 총 상태 수는 센서 수  $N$ 과 같다. 제어 시스템 모델로서는 다음과 같은 표준 연속 시간 선형 시스템 모델을 고려한다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t). \quad (1)$$

여기에서 플랜트 상태 변수  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$ , 시스템 행렬  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ , 입력 벡터  $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^N$ , 플랜트에 적용되는 제어신호  $u \in \mathbb{R}$  을 의미한다. 각 센서는 정기적  $\delta$ 시간으로 플랜트 상태를 샘플링하고, 정보를 전송한다.

표준 선형 피드백 제어기는 샘플링 된 플랜트의 상태  $\mathbf{x}(t)$ 를 전송하고, 통신 지연이 없을 경우 제어 이득  $\mathbf{k} \in \mathbb{R}^N$ 을 가중하여 이상적인 제어신호  $u(k\delta) = -\mathbf{k}^T \mathbf{x}(k\delta)$  을 계산한다. 샘플링 주기보다 짧은 무선통신 지연시간

$\tau \leq \delta$ 을 가정하면,  $k$ 번째 샘플링 주기 동안 두 개의 제어신호  $u((k-1)\delta)$ 와  $u(k\delta)$ 가 적용된다 [2]. 따라서, 통신 지연시간  $\tau$ 이 있을 때 선형 피드백 제어신호는 아래와 같다.

$$u(t^+) = -\mathbf{k}^\top \mathbf{x}(t-\tau), t \in \{k\delta + \tau, k=0,1,2,\dots\}. \quad (2)$$

식 (2)에서  $u(t^+)$ 는 연속 제어신호이며 시간  $k\delta + \tau$ 에서만 변화한다.

## 2.2. 제안된 제어신호

AirCont에서는 모든 센서가 동시에 신호를 전송하여 액추에이터가 무선채널을 통해 직접 제어신호를 수신한다. 이는 다음과 같은 순서로 진행된다. 각 센서는 플랜트 상태를 나타내는 신호  $x_i \in \mathbb{R}$ 을 Tx 스케일링 변수  $\beta_i \in \mathbb{R}$ 에 의해 스케일링하고 무선채널 계수  $h_i \in \mathbb{R}$ 를 통해 액추에이터로 동시에 전송한다. 이때 수신기는 부가적인 백색 가우스 노이즈(AWGN)  $n \in \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ 가 더해진다. 액추에이터는 수신된 신호를 Rx 스케일링 인자  $\alpha$ 로 스케일링하여 센서 데이터의 가중 합계를 다음과 같이 계산한다.

$$u_{air}(t^+) = -\alpha((\mathbf{h} \odot \boldsymbol{\beta})^\top \mathbf{x}(t-\tau_{air}) + n). \quad (3)$$

식 (3)에서  $\tau_{air}$ 는 통신 지연시간을 의미한다.  $n \in \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ 는 수신기의 AWGN이고  $\odot$ 는 Tx 스케일링 인자와 액추에이터에 연결된 각 센서의 무선채널 계수 사이의 Hadamard 곱을 나타낸다. Rx 스케일링 계수  $\alpha$ 는 신호와 잡음 항 모두에 적용된다. 센서는 채널 계수를 알고 있고, 전송이 동기화된다고 가정한다. 또한, 각 센서의 최대 전송 전력 제약 조건인  $\beta_i^2 \leq \bar{p}$ 를 고려하여,  $\beta_i \in [0, \sqrt{\bar{p}}]$ 이다. AirCont의 통신 지연시간은 단일 시간 슬롯  $\tau_{air} = T_s$ 이며, 여기서 시간 슬롯  $T_s$ 은 여러 센서에서 액추에이터로 동시에 전송을 하는 것을 나타낸다.

일반적인 벤치마크 체계의 경우, 플랜트에 부착된 각 센서가 스케일링된 신호  $\beta_i x_i$ 을 제어기에 각각 정보를 전송한다. 정적 스케줄러에 의해 할당된 시간 슬롯을 통해, 각 센서는 샘플링 주기에 해당하는 시간 프레임 사이클  $\delta$  내에서 한 번만 전송할 수 있다. 제어기는 제어신호를 계산하기 위해 Rx 스케일링 계수  $\alpha_{s,i}$ 를 적용하여

센서  $i$ 의 수신된 신호를 스케일링한다. 센서  $i$ 와 제어기 사이의 무선채널은 AWGN,  $n_{s,i} \in \mathcal{N}(0, \sigma_{s,i}^2)$ 와 채널 계수  $h_i$ 을 가진다. 제어기는 계산된 제어신호를 액추에이터로 전송하며, 이때 무선채널은 AWGN  $n_a \in \mathcal{N}(0, \sigma_a^2)$ 와 채널 계수  $h_a$ 를 갖는다. 마지막으로 액추에이터는 수신된 제어신호를  $\alpha_a$ 로 스케일링하여 채널 계수  $h_a$ 을 보상한다. 따라서 일반적인 제어신호는 아래와 같다.

$$u_{sota}(t^+) = -\alpha_a(h_a \boldsymbol{\alpha}_s^\top \mathbf{D} \mathbf{x}(t-\tau_{sota}) + \mathbf{n}_s) + n_a. \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{D}$ 는  $d_{i,i} = h_i \beta_i$ 을 가진 대각 행렬이고  $\tau_{sota}$ 는 통신 지연시간을 의미한다.

일반적인 제어 시스템에서 네트워크 지연시간은 두 가지 주요 요소, 즉 센서-제어기 지연시간  $\tau_{sc}$ 와 제어기-액추에이터 지연시간  $\tau_{ca}$ 로 구성된다. 샘플링 시간에서 최종 제어신호 반영 시간 사이의 지연시간은  $\tau_{sota} = \tau_{sc} + \tau_{ca}$ 이다. 일반적인 제어 시스템에서는 모든 센서에서 제어기로의 전송이 필요하기 때문에 각 샘플링 시간으로부터 제어신호 적용까지의 최소 지연시간은  $\tau_{sota} = (N+1)T_s$ 다. 이와는 대조적으로, AirCont는 다수 센싱 신호의 통신 및 제어신호 계산이 하나의 시간 슬롯에 완료된다.

## III. 성능 분석

본 장은 AirCont와 일반적인 제어기의 안정화 조건을 도출하고, 제어신호의 컴퓨팅 오차를 분석한다.

### 3.1. 안정성 분석

일반적으로 연속 시간 시스템을 이산 시간 시스템으로 근사화 할 때는 높은 샘플링 속도가 요구 된다. 그러나 무선 기반 제어 시스템의 경우 샘플링 속도가 높을수록 네트워크의 트래픽이 상승하여, 지연시간을 증가시킨다 [1]. 따라서 WNCS 설계는 제어 안정성을 보장하고 무선 네트워크에 의해 달성될 수 있는 샘플링 속도와 지연시간을 찾아야 한다.

본 장에서는 두 가지 정의, 최대 안정영역과 달성 가능한 안정영역을 소개한다.

**정의 1** (최대 안정영역). 페루프 시스템의 제어 안정성을

보장하는 샘플링 주기  $\delta$ 와 지연시간  $\tau$ 값의 집합이다.

**정의 2** (달성 가능한 안정영역). 무선 네트워크가 지원할 수 있는 샘플링 주기  $\delta$ 와 지연시간  $\tau$ 의 집합으로, 페르프 시스템의 제어 안정성을 보장한다.

본 장에서는 논문[2]의 접근 방식을 확장하여 AirCont기반 시스템과 일반적인 시스템의 안정성을 분석한다. 샘플링 주기  $\delta$ 를 고려한, 이산 시간 선형 시스템은 다음과 같다.

$$\bar{\mathbf{x}}((k+1)\delta) = \Phi \bar{\mathbf{x}}(k\delta) + \Gamma_0(\tau) \bar{u}(k\delta) + \Gamma_1(\tau) \bar{u}((k-1)\delta). \quad (5)$$

여기서  $\Phi = e^{A\delta}$  이며,  $\bar{\mathbf{x}}$ 와  $\bar{u}$ 는  $\mathbf{x}$ 와  $u$ 의 노이즈에 대한 기대값이다. 또한,

$$\Gamma_0(\tau) = \int_0^{\delta-\tau} e^{A s} \mathbf{B} \, ds, \Gamma_1(\tau) = \int_{\delta-\tau}^{\delta} e^{A s} \mathbf{B} \, ds. \quad (6)$$

$\Gamma_0(\tau)$ 과  $\Gamma_1(\tau)$ 은 지연시간  $\tau$ 로 인한 두 개의 제어 신호  $\bar{u}(k\delta)$ 와  $\bar{u}((k-1)\delta)$ 의 입력 행렬이다.

$\mathbf{z}(k\delta) = [\bar{\mathbf{x}}^\top(k\delta) \quad \bar{u}^\top((k-1)\delta)]^\top$ 를 정의했을 때 확장된 선형 시스템은 다음과 같다.

$$\mathbf{z}((k+1)\delta) = \tilde{\Phi} \mathbf{z}(k\delta). \quad (7)$$

이산 시간 선형 시스템은 전달 행렬의 스펙트럼 반경이 1보다 작은 경우  $\rho(\tilde{\Phi}) < 1$ , 안정성을 보장한다.

식 (3)의 AirCont 방식을 사용하면 식 (7)의 전달 행렬을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{\Phi}_{air} = \begin{bmatrix} \Phi - \Gamma_0(\tau_{air}) \alpha (\mathbf{h} \odot \boldsymbol{\beta})^\top & \Gamma_1(\tau_{air}) \\ -\alpha (\mathbf{h} \odot \boldsymbol{\beta})^\top & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

행렬  $\tilde{\Phi}_{air}$ 는 제어 시스템 성분과 무선 통신 성분을 모두 포함한다.

이와 유사한 방법으로, 일반적인 시스템의 경우 식 (4)를 고려하여 전달 행렬을 다음과 같이 도출한다.

$$\tilde{\Phi}_{sota} = \begin{bmatrix} \Phi - \Gamma_0(\tau_{sota}) \alpha_a h_a \boldsymbol{\alpha}_s^\top \mathbf{D} & \Gamma_1(\tau_{sota}) \\ -\alpha_a h_a \boldsymbol{\alpha}_s^\top \mathbf{D} & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

최대 안정영역은 식 (8)과 (9)의 스펙트럼 반경에 의해 결정되는 반면, 달성 가능한 안정영역은 조건  $\tau_{air} \leq \delta$  및  $\tau_{sota} \leq \delta$ 로 제한된 최대 안정영역의 하위 집합으로 구성된다.

### 3.2. 제어신호 컴퓨팅 오차 분석

본 절에서는 센서의 개별 Tx 스케일링 제약 조건에 따라 AirCont와 일반적인 제어기의 제어신호 컴퓨팅 오차를 MSE(Mean Squared Error)로 분석 한다.

기존 [5,9]은 Over-the-air computation에 대한 Tx-Rx 스케일링 최적화 문제를 고려했는데, 주요 목표는 주어진 센서의 Tx 스케일링 한계에 따라 센싱 신호 합의 컴퓨팅 오차를 최소화하는 것이다. 본 논문은 기존 연구 [5,9]를 기반으로 제어신호  $\mathbf{k}^\top \mathbf{x}$ 의 평균 MSE를 최소화하는 문제를 고려한다. 분석을 단순화하기 위하여 신호  $x_i$ 가 독립적이며 표준 정규 분포  $N(0, 1)$ 을 따른다고 가정한다.

먼저 AirCont기반 제어신호의 컴퓨팅 오차를 분석한다. 식 (3)과 제어신호  $\mathbf{k}^\top \mathbf{x}$  사이의 MSE는 아래 식과 같다.

$$\text{MSE} = E \left[ \left| \alpha (\mathbf{h} \odot \boldsymbol{\beta}^\top \mathbf{x} + n) - \mathbf{k}^\top \mathbf{x} \right|^2 \right] = (\alpha (\mathbf{h} \odot \boldsymbol{\beta}) - \mathbf{k})^\top (\alpha (\mathbf{h} \odot \boldsymbol{\beta}) - \mathbf{k}) + \sigma^2 \alpha^2. \quad (10)$$

여기서 MSE의 기대값은  $\mathbf{x}$ 와  $n$  분포에 대하여 계산 된다. 먼저, Tx 스케일링에 제약이 없을 시 MSE 최소화 문제의 최적 Tx-Rx 스케일링 값을 분석한다. 최적 Tx-Rx 스케일링 값은 각각 식 (10)의 첫 번째 항과 두 번째 항을 최소화하므로  $\beta_i \rightarrow k_i / (\alpha h_i)$ ,  $\alpha \rightarrow 0$  이다. Tx-Rx 스케일링 값을 식 (10)에 대입하면, AirCont기반 제어신호 MSE는 0에 수렴한다. 그러나 Tx 스케일링 제약 조건이 있을 시 최적화 문제는 non-convex한 형태가 된다. 이를 해결하기 위하여 기존 Tx-Rx 스케일링 방법[9]을 신호의 가중 합계 MSE 최소화 문제로 확장하고 성능을 평가한다.

일반적인 시스템의 경우, 센서 Tx 스케일링 인자  $\beta$ , 제어기 Rx 스케일링 인자  $\alpha_s$  및 액추에이터 Rx 스케일링 인자  $\alpha_a$ 와 식 (4)를 고려한 제어신호  $\mathbf{k}^\top \mathbf{x}$ 의 컴퓨팅 오차 MSE는 다음과 같다.

$$\text{MSE} = E \left[ \left| \alpha_a (h_a \boldsymbol{\alpha}_s^\top (\mathbf{D} \mathbf{x} + \mathbf{n}_s) + n_a) - \mathbf{k}^\top \mathbf{x} \right|^2 \right] = (\alpha_a h_a \mathbf{D} \boldsymbol{\alpha}_s - \mathbf{k})^\top (\alpha_a h_a \mathbf{D} \boldsymbol{\alpha}_s - \mathbf{k}) + \alpha_a^2 h_a^2 \sigma_s^2 \boldsymbol{\alpha}_s^\top \boldsymbol{\alpha}_s + \alpha_a^2 \sigma_a^2. \quad (11)$$

여기서 MSE의 기대값은  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{n}_s$ ,  $n_a$ 의 분포에 대하여 계산된다. 대각 행렬  $\mathbf{D}$ 는 채널 계수  $\mathbf{h}$ 와 Tx 스케일링 계수  $\boldsymbol{\beta}$ 에 따라  $d_{i,i} = h_i \beta_i$ 로 달라짐을 알고 있으므로, Tx 스케일링에 제약 조건이 없을 시, 최적값은

$\beta_i \rightarrow k_i / (\alpha_a \alpha_{s,i} h_i)$ ,  $\alpha_a \rightarrow 0$ ,  $\alpha_{s,i} \rightarrow 0$ 이며, 이때 MSE가 0으로 수렴한다.

Tx 스케일링이 제한된 최적화 문제의 경우 센서-제어기의  $\beta^*$ 와  $\alpha_s^*$ , 제어기-액추에이터의  $\alpha_a^*$ 를 최적화하는 두 가지 하위 문제로 분리한다. 식 (11)에서  $\mathbf{h}$ ,  $\mathbf{k}$  및  $\sigma_s^2$ 을 고려하여 문제를 다음과 같이 재구성하였다.

$$\text{MSE}_{\text{Sota}}^{\text{sc}} = (\mathbf{D}\alpha_s - \mathbf{k})^\top (\mathbf{D}\alpha_s - \mathbf{k}) + \sigma_s^2 \alpha_s^\top \alpha_s. \quad (12)$$

식 (12)의 첫 번째 항을 최소화하기 위해 센서  $i$ 와 제어기 간  $\beta_i$ 와  $\alpha_{s,i}$ 의 각 쌍을  $\mathbf{D}\alpha_s = \mathbf{k}$ 에 맞게 최적화한다. 식 (12)의 노이즈 항은  $\alpha_s$ 에만 의존하므로 최적의 값은  $\beta_i^* = \sqrt{p}$ ,  $\alpha_{s,i}^* = (h_i k_i \beta_i^*) / ((h_i \beta_i^*)^2 + \sigma_s^2)$ 이다. 식 (11)에  $\beta_i^*$ 와  $\alpha_{s,i}^*$ 을 삽입하여, 대각 행렬  $\mathbf{D}^*$ 를  $\beta^*$ 의 함수로 계산할 시, 액추에이터의 최적 스케일링 계수는  $\alpha_a^* = (h_a \alpha_s^{*\top} \mathbf{D}^* \mathbf{k}) / (h_a^2 \alpha_s^{*\top} (\mathbf{D}^*)^2 \alpha_s + h_a^2 \sigma_s^2 \alpha_s^{*\top} \alpha_s^* + \sigma_a^2)$ 이다. 그러나 액추에이터가  $\mathbf{h}$ ,  $\beta^*$ ,  $\alpha_s^*$ ,  $\sigma_s^2$  외에  $h_a$ ,  $\sigma_a^2$ ,  $\mathbf{k}$ 을 포함한 센서-제어기 사이 정보가 필요하기 때문에 센서-제어기-액추에이터 구조는 AirCont에 비해 최적화 복잡도가 크게 증가한다.

#### IV. 성능 평가

본 장에서는 AirCont기반 시스템의 제어 안정성과 평균 MSE를 일반적인 벤치마크 제어 시스템과 비교 분석한다.

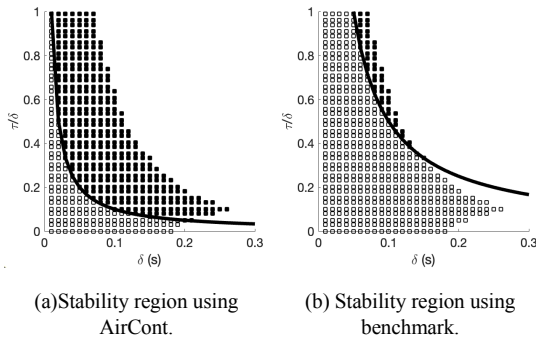


Fig. 2 Maximum stability region and achievable stability region using AirCont and benchmark with different sampling period  $\delta$  and delay  $\tau$ .

#### 4.1. 안정성 평가

먼저 샘플링 주기  $\delta$  및 지연시간  $\tau$ 와 제어 시스템의 최대 안정영역 및 달성 가능한 안정영역을 분석한다. 제어 시스템의 예제로는 불 위치 제어 시스템을 고려하였으며, 이는  $N=4$  센서와 1개 액추에이터로 구성된 선형 시불변 시스템 모델 형태를 갖는다 [8]. 그림 2는  $\tau \leq \delta$ 에 대해 다양한 샘플링 주기  $\delta$ 와 지연시간  $\tau$ 를 갖는 AirCont 및 일반적 벤치마크 시스템의 최대 안정영역과 달성 가능한 안정영역을 보여준다. 비교를 위해, AirCont 및 벤치마크 시스템은 동일한 제어 이득  $\alpha(\mathbf{h} \odot \beta)^\top = \alpha_a h_a \alpha_s^\top \mathbf{D} = [6.67, 11.09, 41.15, 11.27]$ 을 설정한다. 여기서  $\mathbf{D}$ 는 잡음이 없는  $\mathbf{h}$ 와  $\beta$ 의 함수이다.

샘플링 주기  $\delta$ 와 지연시간  $\tau$ 가 주어지면 식 (8)과 (9)의 스펙트럼 반경을 평가하여 제어 안정영역을 판별한다. 그림 2에서 사각 마커로 표시된 포인트는 최대 안정영역을 나타낸다. 예상대로, 네트워크 영향이 명시적으로 고려되지 않기 때문에 AirCont와 벤치마크 시스템의 최대 안정영역이 동일하다. 네트워크 영향을 반영한 AirCont와 벤치마크 시스템의 달성 가능한 안정영역은 채워진 사각 마커로 표현된다. 그림 2의 실선은 실현 가능한 샘플링 주기와 지연시간  $\tau \leq \delta$ 의 하한선을 의미한다.

그림 2에서, 제어 시스템이  $\delta \leq 0.07\text{s}$  동안 전체 샘플링 주기까지의 시간지연에 대한 안정성을 보장하므로, 일반적으로 최대 안정영역은 낮은 샘플링 주기와 낮은 지연시간이 바람직하다. 그러나, 샘플링 주기가 증가하면 최대 안정영역의  $\tau/\delta$  상한은 급격히 감소한다.  $\delta > 0.26\text{s}$  일 때 지연시간이 없더라도 제어 시스템이 불안정하다. 또한, 그림 2와 같이 지연시간이 낮은  $\tau/\delta \leq 0.11$ 이  $0.18\text{s} \leq \delta \leq 0.26\text{s}$  동안 제어 안정성이 보장되지 않는 것을 알 수 있어 최대 안정영역 경계를 정량화하는 것은 복잡한 일이다.

그림 2(b)에서, 벤치마크 시스템은 최소 지연시간 제약인  $\tau_{\text{sota}} = 0.05\text{s} \leq \delta$ 로 인해  $\delta \leq 0.05\text{s}$ 에 대한 플랜트의 안정성을 제공할 수 없다. 반면, AirCont의 최소 샘플링 주기는  $\delta = 0.01\text{s}$ 로, 노드의 수에 비례하는 벤치마크 제어기의 샘플링 주기보다 매우 낮다. 달성 가능한 안정영역이 넓을수록 무선 네트워크를 통한 손실과 지연에 대하여 높은 강건성을 보장할 수 있으며, 샘플링 속도를 낮춰 네트워크의 에너지 효율성을 개선시킬 수 있다. 그림 2(a)와 2(b)를 비교하면, AirCont기반 시스템의 달성 가능한 안정영역이 벤치마크 시스템에 비하여

약 7.3배 크다는 것을 알 수 있다. 주된 이유는 AirCont가 제어신호 관련 통신 및 컴퓨팅을 센서 수와 무관하게 단일 시간 슬롯 안에 완료할 수 있기 때문이다.

#### 4.2. MSE 성능

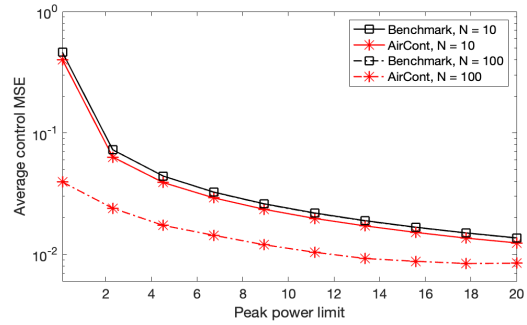
본 절에서는 다양한 Tx 스케일링 한계, 노이즈 채널 및 센서 수에 따른 AirCont와 벤치마크의 평균 MSE를 비교 분석한다. 별도로 명시되지 않은 경우 최대 송신 전력은  $\bar{p}=5$  및 노이즈 분산은  $\sigma^2 = \sigma_s^2 = \sigma_a^2 = 0.1$ 로 기존 관련 논문과 같이 설정한다 [7,9]. 무선채널 계수는 단위 분산을 따르는 i.i.d 레일리 페이딩 모델로 생성한다. 제어 이득은 균일하게 생성된 무작위 값을 0에서 100 사이의 값으로 생성한다. 제어 이득의 효과를 정규화하기 위해, 평균 제어 MSE는  $E[\text{MSE}]/(\mathbf{k}^\top \mathbf{k})$ 의 평균값으로 정의한다. 몬테 카를로 시뮬레이션을 통하여 다양한 무선채널과 제어이득을 설정하고 평균 제어 MSE를 계산한다.

그림 3(a)은 최대 전력 한계  $\bar{p} = 0.1, \dots, 20$ 를 변화시키면서 센서 수  $N = 10, 100$ 일 때 AirCont와 벤치마크 시스템의 평균 제어 MSE를 나타내고 있다. 그림에서 평균 제어 MSE는 로그 스케일로 표현되었다. AirCont의 평균 제어 MSE는 다양한 Tx 스케일링 제약 조건에서 일관되게 벤치마크의 MSE 성능을 능가한다. 두 제어 시스템의 평균 제어 MSE는 최대 전력 한계에 따라 감소하지만, 전력 제약 조건이 엄격해질수록 이들 사이의 성능차이는 증가할 수 있다. AirCont는 최대 전력 제한이 완화되고 센서 수가 증가함에 따라 관련 이점이 개선되어 평균 제어 MSE가 0에 근접하는 반면, 벤치마크 제어 시스템은 센서 수의 영향이 미비하다.

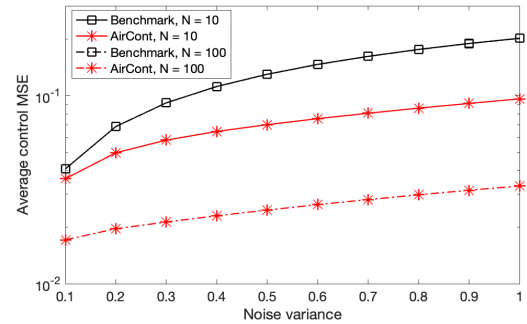
그림 3(b)은 AirCont와 벤치마크 시스템의 노드 수가  $N = 10, 100$ 일 때, 노이즈 분산  $\sigma^2 = \sigma_s^2 = \sigma_a^2 = 0.1, \dots, 1$ 에 따른 평균 제어 MSE를 나타낸다. 두 시스템의 평균 제어 MSE는 노이즈 분산에 따라 증가한다. AirCont는 전체 노이즈 범위에 걸쳐 벤치마크 시스템 보다 현저하게 낮은 평균 제어 MSE를 제공한다.

AirCont의 MSE 이득은 노이즈 분산이 증가함에 따라 증가한다. 또한, AirCont는 다수의 노드  $N = 100$ 에 대한 평균 제어 MSE를 상당히 개선시키지만, 관련 노드 수의 영향은 개별 센서 전송의 노이즈로 인하여 벤치마크 시스템에서는 무시할 수 있다. 그림 3을 통하여,

AirCont기반 시스템은 Tx 스케일링 한계가 엄격해지고, 많은 수의 센서 노드가 높은 노이즈 채널을 공유해야 할 때 WNCS의 성능을 크게 향상시킬 수 있는 방안이다.



(a) Average control MSE versus different Tx scaling limits.



(b) Average control MSE versus different noise variance.

**Fig. 3** Average control MSE of both AirCont and benchmark with  $N = 10, 100$  for various Tx scaling limits and noise.

## V. 결론

본 논문은 Over-the-air computation 개념을 활용하여 제어기 없이 제어 시스템의 제어신호를 계산하는 기법인 AirCont를 제시한다. 일반적인 무선기반 제어 시스템의 센서-제어기-액추에이터 구조와 다르게, AirCont는 제어신호를 센싱 신호의 가중 합으로 계산하기 위해 무선채널을 활용하여 통신과 컴퓨팅을 효과적으로 통합한다. 제시된 AirCont를 활용하여 기존의 일반적인 제어 시스템에 비해 시스템의 안정영역을 획기적으로 개선할 수 있으며, 제어신호의 컴퓨팅 오차를 효율적으로 감소시킬 수 있다는 것을 확인했다.

## REFERENCES

- [ 1 ] P. Park, S. C. Ergen, C. Fischione, C. Lu, and K. H. Johansson, "Wireless network design for control systems: A survey," in *IEEE Communications Survey & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 978-1013, 2018.
- [ 2 ] J. Lunze, *Control Theory of Digitally Networked Dynamic Systems*. pringer, Heidelberg, 2014.
- [ 3 ] P. Park, P. D. Marco, and K. H. Johansson, "Cross-Layer Optimization for Industrial Control Applications using Wireless Sensor and Actuator Mesh Networks," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 4, pp. 3250-3259, Apr. 2017.
- [ 4 ] P. Park, H. S. Ghadikolaei, and C. Fischione, "Proactive fault-tolerant wireless mesh networks for mission-critical control systems," in *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 186, pp. 103082, 2021.
- [ 5 ] O. Abari, H. Rahul, and D. Katabi, "Over-the-air function computation in sensor networks," 2016.
- [ 6 ] H. Hellstrom, J. Mairton B. da Silva Jr, V. Fodor, and C. Fischione, "Wireless for machine learning," 2020.
- [ 7 ] X. Cao, G. Zhu, J. Xu, and K. Huang, "Optimized power control for over-the-air computation in fading channels," in *IEEE Transactions on Wireless Communication*, vol. 19, no. 11, pp. 7498-7513, 2020.
- [ 8 ] G. C. Goodwin, S. F. Graebe, and M. E. Salgado, *Control System Design*, Prentice Hall, 2000.
- [ 9 ] W. Liu, X. Zang, Y. Li, and B. Vucetic, "Over-the-air computation systems: Optimization, analysis and scaling laws," *IEEE Transactions on Wireless Communication*, vol. 19, no. 8, pp. 5488-5502, 2020.



정민규(Mingyu Jung)

2020년 3월 충남대학교 정보통신공학부 학사  
2020년 3월~현재 충남대학교 정보통신공학과 석사  
※관심분야: 딥러닝, 무선 제어 네트워크



박판근(Pangun Park)

2005년 8월 아주대학교 전자공학부 학사  
2007년 11월 Royal Institute of Technology 무선시스템공학과 석사  
2011년 3월 Royal Institute of Technology 정보통신공학과 박사  
2011년 3월~2011년 9월 Royal Institute of Technology 박사후 연구원  
2011년 9월~2013년 8월 University of California, Berkeley 박사후 연구원  
2013년 9월~2015년 2월 한국전자통신연구원 선임연구원  
2015년 3월~2016년 2월 경상대학교 정보통신공학과 조교수  
2016년 3월~현재 충남대학교 전자정보통신공학과 부교수  
※관심분야: 무선 제어 네트워크, 사이버물리시스템, 네트워크 제어시스템