

# 특화망 환경에서 로봇 원격 제어 구현 및 지연 시간 단축 기법 성능 분석

서명진\*, 권순호\*, 국수진, 김성륜  
연세대학교 전기전자공학부

{mjsuh, 2019142007, sjkook05, slkim}@yonsei.ac.kr

## Latency Analysis on Wireless Robot Control using Private 5G Systems

MyungJin Suh, Soonho Kwon, Sujin Kook and Seong-Lyun Kim  
School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei Univ.

### 요약

본 논문에서는 특화망 환경에서 이미지 처리를 기반으로 로봇을 원격에서 제어할 수 있는 시스템을 구현했다. 해당 시스템을 기반으로 실시간 로봇 동작 중 위급 상황 발생 시 로봇을 지연 없이 멈추는 것을 목표로 설정한다. 이에 따라 이미지 전송 및 분석 시 발생하는 지연 시간을 줄이는 세가지 방법을 제안한다. 프레임은 랜덤으로 전송하거나 프레임 차이 변화를 감지하여 전송하는 방법이 있으며, 로컬 서버에서 이미지 처리를 해 서버 간 전송을 생략하는 방법이 있다. 각각의 방법들을 시스템에 적용해 지연 시간 단축에 대한 성능을 분석하였으며 이를 통해 관련 분야에서의 활용 가능성을 제시하고 향후 연구 방향성을 모색한다.

### I. 서론

최근 인공지능을 활용하여 로봇을 실시간으로 제어하기 위한 관심이 커지고 있다. 컴퓨팅 능력이 제한적인 로봇에서 인공지능 서비스를 실시간으로 지원하기 위해서는 Multi-access Edge Computing (MEC) 기술이 많이 활용되고 있다. MEC는 무선 통신을 통해서 데이터를 전달받아 고성능의 컴퓨팅 장비로 빠르게 데이터를 처리해준다는 장점이 있지만, 무선 통신망을 통해서 데이터를 전달하기 때문에 통신망의 성능에 지연 시간이 영향을 많이 받는다 [1]. 특히, 상용 5G의 경우 교외 지역 등에서 서비스 속도가 충분하지 않다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해서 특화망이 스마트 공장 등의 분야에서 많이 각광받고 있다 [2]. 본 연구에서는 특화망에서의 MEC를 활용한 로봇 원격 제어 시스템을 구현하였다. 로봇이 동작하는 중에 사람의 신체가 이를 방해하거나 위험한 상황이 발생하는 경우 로봇을 빠르게 멈추는 것을 목표로 기존 시스템 대비 지연 시간을 단축하기 위한 세가지 알고리즘을 제안하였다. 각 방법을 적용한 시스템의 실제 지연 시간을 측정하여 비교하고 이를 최소화할 수 있는 방안을 검증해보고자 한다.

### II. 로봇 원격 제어 시스템

#### 1) 테스트베드 구조

본 연구에서는 그림 1 과 같이 구성되어 있는 연세대학교 특화망 테스트베드 [3]에 로봇 원격 제어 시스템을 구현하여 실험을 진행하였다. 테스트베드의 각 구성에 대한 설명은 다음과 같다. 실시간으로 이미지를 촬영하는 카메라는 로봇에 부착되어 있어, 로봇의 높이가 낮아짐에 따라 촬영되는 영역이 좁아진다. 로컬 서버는 카메라와 로봇을 제어하고, 5G 모델과 연결되어 있어 데이터를 특화망을 통해 전송하는 역할을 함께 수행한다. 특화망은 RU (radio unit), DU (digital unit), 코어로 구성되어 있으며, 4.7GHz 대역 (Sub 6GHz)에서 동작한다. 5G 모델을 통하여 로컬 서버에서 무선으로 송신된 데이터는 RU에서 수신하여 5G 코어를 거쳐 MEC 서버로 전송된다. MEC 서버는 고성능의

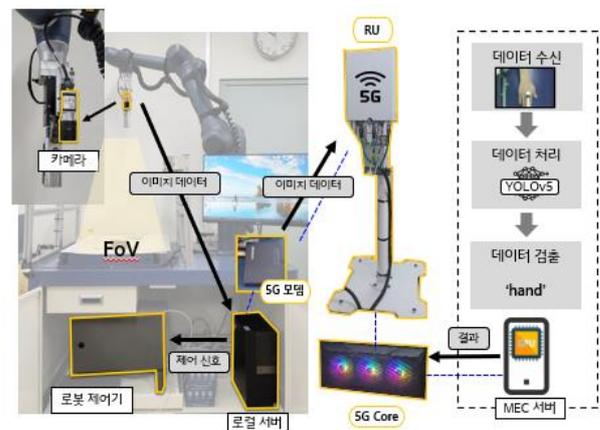


그림 1. 로봇 원격제어 테스트베드 구성

컴퓨팅 장비를 탑재하고 있어, 로컬 서버에서 받은 데이터를 인공지능 모델을 통해 분석하는 역할을 수행한다.

로봇 원격 제어가 진행되는 과정은 다음과 같다. 카메라에서 이미지를 촬영하여 로컬 서버로 전송하고, 로컬 서버는 해당 데이터를 MEC로 전송한다. MEC에서는 수신 받은 이미지 데이터를 Yolo v5 (You Only Look Once) [4] 모델을 활용해 이미지 내부에 있는 물체의 종류와 위치 정보를 도출하여 로컬 서버로 전송한다. 로컬 서버에서는 해당 정보를 활용하여 로봇에 전달해야 하는 제어 신호를 결정하여 전송한다.

#### 2) 위급상황 검출 시나리오

로봇이 동작하는 상황에서 손과 같이 사람의 신체가 로봇에 접근하는 상황을 위급 상황으로 정의하였다. 로봇이 움직이는 도중 카메라로 촬영되는 영역을 접근 위험 지역으로 설정하여, 해당 영역에 사람의 신체가 검출되면 위급 상황이 발생한 것으로 가정하였다. 따라서 촬영된 이미지 내에 '손' 객체가 검출되면 위급 상황으로 인식하였다. 이 때, 해당 객체가 검출되면 로컬 서버에서 로봇에 '정지' 신호를 전달하여 로봇의 동작을 멈추도록 위급 상황

시나리오를 테스트베드 내에 적용하였다. 이를 활용해 MEC를 기반으로 동작하는 로봇 원격 제어 시스템이 위급 상황을 검출하여 정지하는 지연 시간을 단축하기 위한 최적의 방안을 찾고자 다음 III.에서 3 가지 알고리즘을 제안하였다.

### III. 지연 시간 분석

본 연구에서는 로봇 동작 중 손이 출현했을 때 로봇이 멈추는 데까지 걸리는 시간을 총 지연 시간으로 정의하였으며, 지연 시간은 5 개의 구간으로 나누어진다. (1) 로컬 서버에서 사진을 촬영하는 시간, (2) 이미지 데이터를 로컬 서버에서 MEC로 전송하는 시간, (3) MEC 서버에서 이미지 데이터를 분석하는 시간, (4) MEC에서 분석 결과를 로컬 서버로 전송하는 시간, (5) 로컬 서버에서 로봇으로 제어 신호를 전달하는 시간. (1), (3), (5) 시간은 데이터 크기와 컴퓨팅 자원에만 영향을 받으므로 일정하게 나타나는 특징을 가지지만, (2), (4) 시간은 특화망의 실시간 속도에 영향을 많이 받는다.

기존의 로봇 원격 제어 시스템에서는 이미지를 촬영하는 간격을 단축시키게 되면, 데이터가 처리되는 속도보다 이미지 촬영 속도가 더 빨라 처리가 시작될 때까지의 지연시간이 크게 늘어난다는 단점이 있다. 이와 같은 문제를 극복하고 촬영 속도를 증가시켰을 때 지연 시간을 단축하기 위해서 다음과 같은 알고리즘을 적용해보았다.

- (1) 랜덤 선택 방법: 로컬 서버에서 촬영된 이미지를 임의의 확률로 선택하여, 선택된 이미지만 MEC 서버로 전송하는 방법이다.
- (2) 이미지 차이 기반 선택 방법: 로컬 서버에서 전/후 이미지 사이의 차이를 측정하여, 차이가 특정 임계 값 이상이 되는 이미지에 대해서만 MEC로 전송하는 방법이다. 이를 위해, 이미지를 gray scale로 변환 후, 픽셀 차이를 binary scale로 계산한다.
- (3) 로컬 데이터 검출 기반 선택 방법: MEC로 이미지를 전송하기 전에 로컬 서버에서 Haar 모델을 활용하여 위급 상황만을 선제적으로 검출하는 방법이다. 해당 모델은 MEC에서 활용하는 YOLOv5 보다 가벼운 모델이기 때문에 컴퓨팅 자원이 부족한 장비에서도 빠르게 물체를 검출할 수 있다는 장점이 있다 [5].

### IV. 실험 결과

그림 2에서는 III.에서 언급한 알고리즘을 로봇 원격 제어 시스템에 적용하여 측정된 지연 시간을 보여준다. FPS (frame per second)는 이미지 촬영 간격과 연관된 수치로, FPS가 높아짐에 따라서 이미지 촬영 간격은 짧아짐을 의미한다. 이를 통해, FPS가 높아짐에 따라 지연 시간 단축에 대한 성능을 확인하고자 하였다. 랜덤 전송 방법의 경우 이미지를 선택하는 확률을 50%로 설정하였고, 이미지 차이 기반 선택 방법의 경우 임계 값을 30%로 설정하였다.

제안한 세 가지 방법 모두 기본 방식 대비 지연 시간 단축이 되는 것을 확인하였다. 이는 기본 방식이 모든 이미지를 MEC 서버로 전송한 것과 달리 제안하는 방법들은 확률적 또는 필요한 이미지만 선택적으로 MEC 서버에 전송하였기 때문이다. 그 중에서 로컬 데이터 검출 기반 선택 방법이 가장 적은 지연시간을 보였는데, 이는 로컬 서버와 MEC 서버 사이의 데이터 송수신에 대한 지연 시간이 생략된 결과이다. 하지만, 해당 알고리즘은 속도가 빠른 반면, 정확도가 떨어지는 단점이 있기 때문에 이를 추후 연구를 통해 해결할 필요가 있다.

랜덤 선택 방법의 경우, 위급 상황이 발생했음에도 해당 이미지가 전송되지 않는 경우에 추가적인 지연시간이 발생하여 FPS 증가에 따른 경향성이 일정하게 보이지 않고,

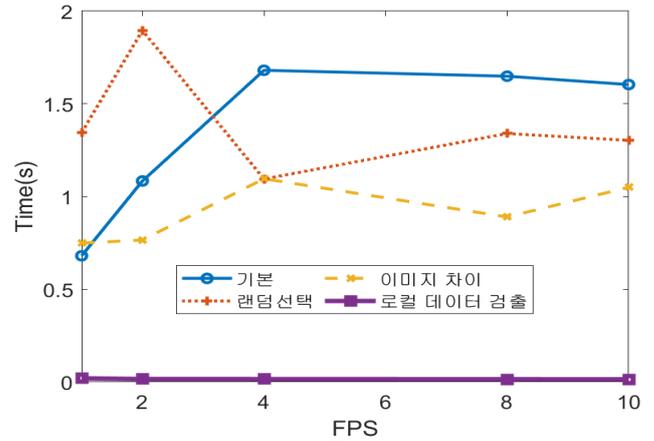


그림 2. 알고리즘 별 지연 시간

FPS가 4일 때 가장 짧게 측정되었다. 이에 반해 이미지 차이 기반 선택 방법의 경우 프레임 변화를 계산하여 이미지를 선택하기 때문에 손이 들어간 이미지를 놓치지 않는 장점이 있다. 하지만, FPS가 증가했을 때 지연 시간이 0.9초 이하로 감소되지 않았다. 이는 로컬 서버와 MEC 서버 사이의 통신을 필요로 하기 때문에 통신 지연 시간에 따른 요인으로 볼 수 있다.

### V. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 특화망을 활용하여 MEC 기술을 적용한 원격 로봇 제어 시스템을 구현하고 MEC와 로컬 서버 간 전송 지연 시간을 줄이기 위한 방법을 실험하고 분석하였다. 이미지 처리 기술에 따라 지연 시간 단축이 가능함을 실험을 통해서 확인하였다. 추후 지연 시간뿐만 아니라 모델의 정확도를 함께 고려하여 이미지 분석 시간 및 전송 시간을 단축할 방법을 모색해 보고자 한다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021-0-00347, 6G 통신을 위한 Post MAC).

### 참고 문헌

- [1] T. X. Tran, et al. "Collaborative Mobile Edge Computing in 5G Networks: New Paradigms, Scenarios, and Challenges," IEEE Communications Magazine, 55(4), 54-61, 2017.
- [2] A. Aijaz, "Private 5G: The Future of Industrial Wireless," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 14, no. 4, pp. 136-145, Dec. 2020.
- [3] "Private 5G, 연구실 내 구축." Ramoyonsei, 3 Aug. 2023, <https://www.ramoyonsei.com/post/private-5g-연구실-내-구축>.
- [4] Redmon, Joseph, et al. "You only look once: Unified, real-time object detection," Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016.
- [5] P. Viola and M. Jones, "Rapid object detection using a boosted cascade of simple features," Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001.