

# 군사용 매니퓰레이터를 위한 저지연 멀티 카메라 스트리밍 시스템 구현

김형래, 이시은, 장다윤, 정솔빈, 김수, 양영준, 조의리, 이성희\*, 김재수, 김동균  
경북대학교, \*아이커넥트

hyeongraekim@knu.ac.kr, leesieun08@knu.ac.kr, dy7596@knu.ac.kr, solbin0724@knu.ac.kr,  
kimsu@knu.ac.kr, youngj719@knu.ac.kr, joeuiri0402@knu.ac.kr, shlee.ICONnect@gmail.com,  
kjs@knu.ac.kr, dongkyun@knu.ac.kr

## Implementation of a low-latency multi-camera streaming system for military manipulators

Hyeongrae Kim, SiEun Lee, DaYun Jang, SolBin Jung, Su Kim, Youngjoon Yang, Euiri  
Jo, Sunghee Lee\*, Jaesoo Kim, Dongkyun Kim

Kyungpook National University, \*iConnect

### 요약

본 논문은 군사용 매니퓰레이터를 위한 저지연 멀티카메라 스트리밍 시스템을 구현하고, 색상 기반  
지연 측정 기법을 통해 성능을 정량적으로 분석하였다. 기존 aiortc 구조의 한계를 FFmpeg 및 RTSPtoWeb 기반  
구조로 개선하여, 평균 0.784 초의 낮은 지연과 안정적인 멀티카메라 운용 성능을 실험적으로 입증하였다.

### I. 서론

현대 군사 작전에서 고신뢰, 저지연 실시간 통신은 필수적이며, 특히 군사용 매니퓰레이터에는 멀티카메라 기반의 실시간 영상 스트리밍이 주요하다. 본 논문은 4 대의 카메라 영상을 1 초 미만 지연으로 송출하는 저지연 스트리밍 아키텍처를 설계하고, 색 기반 지연 측정 기법으로 성능을 검증하였다. 초기 aiortc 기반 WebRTC 구현은 구조적 한계로 인해 성능 저하가 발생하였으며, 이를 해결하기 위해 FFmpeg 기반 RTSP 송출과 Go 언어 기반 RTSP-to-WebRTC 중계 서버를 결합한 아키텍처를 제안하며 실효성을 입증하였다.

### II. 관련 연구

기존의 실시간 영상 스트리밍 연구는 주로 단일 카메라 또는 고정된 네트워크 환경에서의 안정성을 중심으로 진행되었다. aiortc 는 WebRTC 프로토콜을 Python 에서 간편히 다룰 수 있도록 해주지만, 복수 카메라에 대한 스트림 분기, 비동기 처리, ICE 연결성 확보 등의 측면에서 한계를 드러낸다[1]. WebRTC 를 기반으로 한 실시간 시스템 구성 사례는 CDN 과 결합된 구조를 통해 높은 확장성과 안정성을 확보한 바 있으며 [2], 본 연구에서도 이러한 유연한 아키텍처 구성이 적용되었다.

FFmpeg 는 다양한 실시간 영상 처리 시스템에서 객채  
검출 및 스트리밍 목적으로 널리 활용되고 있으며 [3],  
Jetson Nano 와 같은 엣지 디바이스 환경에서도 하드웨어  
가속을 활용한 효율적인 인코딩이 가능하다는 점에서  
실시간 스트리밍 구조의 기반 기술로 사용하였다.

### III. 시스템 설계 및 구현

#### 3.1 초기 설계: aiortc 기반 구조

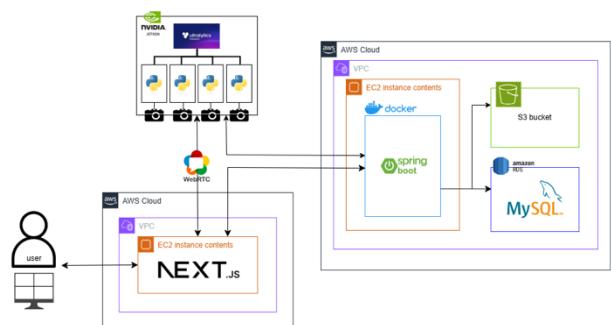


Fig 1. 초기 시스템 설계도

초기 시스템은 Fig1 과 같이 NVIDIA Jetson Nano 에서  
Python 기반 aiortc 를 활용해 브라우저와 직접 P2P  
로 연결하는 구조로 구현되었다. 하지만 aiortc 는 ICE

candidate 교환 자동화가 되지 않아 초기 연결 지연이 발생했고, 멀티카메라 환경에서는 프레임 드롭과 카메라 간 지연 문제가 빈번하여 전체적인 사용자 경험에 저하되었다. 이러한 한계는 다중 시점의 실시간 정보가 중요한 군사용 매니퓰레이터 운용에 있어서 치명적인 병목 요인으로 작용하였다.

### 3.2 개선 설계: FFmpeg + RTSP + WebRTC 중계 서버

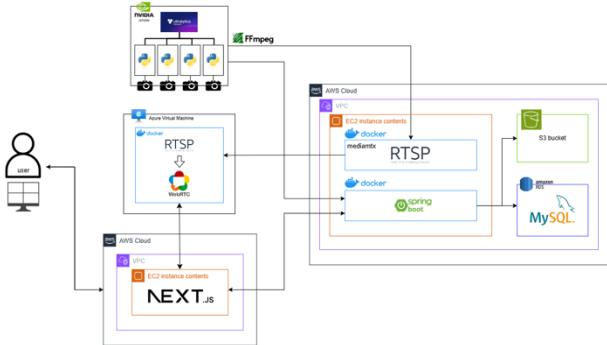


Fig 2. 개선된 시스템 설계도

aiortc 기반 구조의 한계를 보완하기 위해, 본 연구에서는 FFmpeg 와 RTSP 프로토콜을 이용하여 시스템을 Fig2 와 같이 재설계하였다. Jetson Nano 는 각 카메라 장치로부터 MJPEG 포맷의 영상을 캡처한 후, FFmpeg 를 통해 인코딩하여 RTSP 형식으로 송출한다. 카메라는 별도의 경로를 사용하는 독립된 RTSP 스트리밍을 제공하며, 이는 중계 서버로 전달된다.

중계 서버는 Go 언어로 구현된 RTSPtoWeb 서버로 구성되어 있으며, 클라이언트의 요청이 들어오면 해당 RTSP 스트리밍을 받아 WebRTC 포맷으로 실시간 변환하여 제공한다. 이 과정에서 ICE candidate 처리는 WebRTC 표준에 따라 자동으로 수행되며, 초기 aiortc 구조에서 문제가 되었던 수동 처리의 불안정성이 제거되었다. 또한 중계 서버는 멀티카메라 스트리밍을 병렬적으로 처리할 수 있도록 최적화되어 있어, 4 대 이상의 카메라에 대해서도 안정적으로 실시간 스트리밍이 가능하다.

이러한 개선을 통해 전체 시스템은 평균 0.8 초 미만의 지연 시간과 높은 연결 안정성을 확보하게 되었으며, 카메라 간 지연과 프레임 드롭 현상도 현저히 줄어들었다. 결과적으로 이 구조는 군사용 매니퓰레이터의 실시간 제어 환경에 적합한 성능을 보여주며, 향후 확장성 또한 용이한 장점을 갖는다.

## IV. 실험 및 성능 분석

### 4.1 실험 환경 및 방법

본 시스템의 성능을 정량적으로 평가하기 위해, NVIDIA Jetson Nano 를 엣지 디바이스로 활용한 멀티카메라 스트리밍 환경에서 색상 기반의 지연 측정 실험을 수행하였다. Jetson Nano 에는 총 4 대의 USB 카메라가 연결되었으며, 일정한 시간 간격으로 화면 일부의 색상을 빨강, 초록, 파랑 순서로 변경하는 패턴의 영상을 생성하였다. 클라이언트는 특정 좌표에서 색상 데이터를 주기적으로 추출하고, 감지된 변화를 타임스탬프로 기록하였다.

송신 시각은 Jetson 에서 색상 전환이 발생한 시점으로 정의하고, 수신 시각은 브라우저에서 해당 색상이 인식된

시점으로 정의하였다. 양측의 시간 차이를 계산함으로써 end-to-end 영상 지연 시간을 밀리초(ms) 단위로 산출하였다. 이러한 방식은 정확한 end-to-end 지연 측정을 가능하게 한다.

### 4.2 실험 결과

Table 1. 성능 비교 분석

	FFmpeg + RTSPtoWeb 기반	HLS 기반
지연 평균 (ms)	784	12,809

제안한 FFmpeg + RTSPtoWeb 구조는 평균 지연이 0.784 초로, 군사용 실시간 제어 환경에 적합한 응답성을 확보했다. 반면, HLS 구조는 평균 12.8 초 이상의 지연으로 실시간 운영에 부적합했다. 또한 FFmpeg 기반 구조는 병렬 처리를 활용해 4 대 이상의 카메라 스트리밍을 카메라 간 지연 없이 안정적으로 처리했으며, 자동 ICE 후보 수집 기능을 사용하여 aiortc 구조의 문제도 해결했다.

### 4.3 시사점

본 실험을 통해 제안한 색상 기반 지연 측정 기법은 외부 시간 동기화 장비 없이도 송출 시점과 수신 시점 간의 실제 지연 시간을 정밀하게 측정할 수 있음을 입증하였다. 이는 엣지 디바이스 기반의 군사 시스템 환경처럼 측정 조건이 제한적인 상황에서도 실시간 성능 검증이 가능하다는 점에서 실용적 가치가 높다.

FFmpeg + RTSPtoWeb 구조는 WebRTC 의 저지연성과 RTSP 기반 스트리밍의 유연성을 결합하여, 지연에 민감한 군사용 매니퓰레이터 운용 환경에서도 안정적인 영상 스트리밍 성능을 제공함을 실험적으로 확인하였다.

## V. 결론 및 향후 연구

본 논문은 군사용 매니퓰레이터를 위한 저지연 멀티카메라 스트리밍 시스템을 구현하였으며, FFmpeg 와 RTSPtoWeb 을 활용한 구조는 aiortc 의 한계를 효과적으로 보완하였다. 향후에는 센서 연계, 전장 환경에서의 견고성 테스트, 엣지 연산 통합, gstreamer 기반 경량화 스트리밍 등으로 확장성과 효율성을 더욱 강화할 계획이다.

## 논문 사사

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW 중심대학사업의 연구결과로 수행되었음”(2021-0-01082)

## 참고 문헌

- [1] 권순형, 홍성연. "WebRTC를 이용한 지적측량 현장 영상 송출 방안 연구", 비즈니스융복합연구, 8(6), 117-122, 2023.
- [2] 김종권, 임준오, 손예리, 최봉준. "WebRTC 및 CDN 기반 실시간 웹 비디오 편집 협업 시스템 연구", 한국통신학회 학술대회논문집, 2024-11-20, 경북.
- [3] 김지민 외. "FFmpeg 와 YOLO를 이용한 동영상 내 객체 탐지 자동화", 한국정보통신학회 종합학술대회 논문집, 2021-10-28, 전북.