

다중이용시설의 에너지 절감을 위한 IoT 기반 열화상 출입 감지 시스템 구현

천민우, 박시은, 강영명*

성결대학교

minwoce@sungkyul.ac.kr, charm516@sungkyul.ac.kr, ykang@sungkyul.ac.kr*

Implementation of an IoT-based Thermal Imaging Entry Detection System for Energy Saving in Multi-use Facilities

Min Woo Chun, Sieun park, Young-myoung Kang*

Sungkyul Univ.

요 약

본 논문에서는 다중이용시설의 조명 에너지 효율 향상을 목적으로 열화상 센서를 기반으로 출입 인원을 감지하고 채실 인원수에 따라 조명을 자동으로 제어하는 IoT 기반 스마트 제어 시스템을 구현하였다. MLX90640 열화상 센서를 활용하여 실시간으로 온도 분포 프레임을 수집하고 클러스터 추적 알고리즘을 적용하여 사람의 출입 방향을 판별한다. 출입 판별 결과는 ESP32 마이크로컨트롤러를 통해 UDP 프로토콜로 Raspberry Pi에 전달되며 해당 장치는 서버모터를 활용하여 구현한 물리적 스위치 조작기를 통해 실제 조명을 제어한다. 또한 관리자용 웹 인터페이스를 통해 실시간 출입 정보와 조명 상태를 확인하고 원격 제어 기능도 제공함으로써 시설 운영의 편의성을 높였다. 본 시스템은 반복적인 실험을 통해 안정적인 동작을 확인하였으며 향후 스마트빌딩 환경에 확장형 IoT 솔루션으로 활용될 수 있다.

I. 서 론

최근 에너지 자원의 고갈과 기후 변화에 대한 대응이 사회적 이슈로 대두되면서 에너지 효율화에 대한 사회적 관심이 꾸준히 증가하고 있다. 이에 따라 공공기관, 교육기관, 민간 기업 등 다양한 분야에서 전력 소비를 최소화하고 자원 활용의 효율을 극대화하기 위한 스마트 제어 기술의 도입이 활발히 이루어지고 있다. 특히 정보통신기술(ICT) 기반의 환경 제어 시스템은 실시간 데이터 수집 및 연동 제어 기능을 통해 기존 수동 방식의 한계를 극복할 수 있는 기술적 대안으로 주목받고 있다.

그중에서도 다중이용시설 내 조명 제어의 자동화는 에너지 절감 효과가 크고 사용자 편의성과 시설 관리의 효율성까지 동시에 향상할 수 있다는 점에서 주요 기술 과제로 부상하고 있다. 강의실, 회의실, 도서관 등과 같이 사용자 출입 패턴이 불규칙한 공간에서는 채실자의 부재에도 불구하고 조명이 장시간 점등되는 비효율적인 사례가 빈번하게 발생하고 있으며 이는 대규모 시설의 경우 전체 전력 소비의 주요 요인으로 작용한다.

기존 조명 자동화 시스템은 주로 조도 센서, 초음파 센서, 적외선 센서 등을 기반으로 일정 시간 동안 움직임이 없으면 조명을 자동으로 소등하는 방식으로 구현된다. 그러나 이와 같은 방식은 정적인 사용자 활동, 느린 움직임, 복수 인원의 출입과 같은 특수 상황에서 오작동이 발생할 가능성이 높으며 센서의 민감도 및 감지 범위를 환경에 맞게 반복 조정해야 하는 등의 관리상의 제약이 있다. 특히 감지 범위 내에 존재하더라도 움직임이 적은 사용자는 채실자로 인식되지 않는 경우가 발생하며 이는 사용자 불편과 불필요한 전력 낭비를 동시에 유발한다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 보다 정밀한 출입 감지 기능과 실시간 대응 능력을 갖춘 지능형 시스템이 요구된다. 또한 시설 이용자의 프라이버시 침해를 최소화하면서도 공간 내 활용 상태를 정확히 판단할 수 있는 감지 기술이 필수적이다. 최근에는 비전 기반 기술, 인공지능 기반 영상 분석 등 다양한 대안이 제시되고 있으며 이 중 열화상 센서(Thermal Imaging Sensor)는 비접촉식 감지, 낮은 해상도 기반의 프라이버시 보호,

조도나 움직임에 무관한 안정성 등으로 인해 높은 실용성을 보인다.

본 논문에서는 기존 시스템의 한계를 극복하고 보다 정밀하고 안정적인 출입 감지를 바탕으로 조명을 자동 제어할 수 있는 IoT 기반 스마트 환경 제어 시스템을 제안한다[1].



[그림 1] 시스템 아키텍처

II. 본론

2.1 시스템 구성

본 시스템은 열화상 센서를 기반으로 출입 인원을 감지하고 채실 인원수에 따라 조명을 자동으로 제어하는 IoT 기반 스마트 제어 시스템이다. 시스템은 MLX90640 열화상 센서와 ESP32 마이크로 컨트롤러로 구성된 출입 감지 및 연산부, Raspberry Pi와 서버모터를 활용한 물리적 스위치 조작기로 구성된 조명 제어부, 실시간 모니터링 및 원격 제어가 가능한 관리자용 웹 인터페이스로 구성된다. [그림 1]은 시스템의 전체 구성과 동작 개요를 간략히 소개하며 이후 각 절에서 기술적 세부 사항을 다룬다.



[그림 2] 클러스터 추적 알고리즘 동작 과정

2.2 출입 감지부 구현

출입 감지부는 MLX90640 열화상 센서와 ESP32 마이크로 컨트롤러를 기반으로 구현되었다[2]. 32x24픽셀 해상도의 열화상 센서는 출입문 상단에 수평으로 설치되어 실시간 온도 분포 프레임을 수집한다. ESP32는 수집된 온도 분포 프레임 데이터를 활용하여 클러스터 추적 알고리즘 연산을 수행한다. 클러스터 추적 알고리즘의 처리 과정은 다음과 같다. 첫째, 수집된 온도 분포 프레임은 설정된 임계 온도를 기준으로 이진화(Binary Segmentation) 처리된다. 이를 통해 사람의 체온과 배경 온도를 명확하게 구분한다. 둘째, Flood-fill 기반 라벨링 알고리즘을 적용하여 연결된 온도 이상 영역을 하나의 클러스터로 인식하고 중심 좌표를 계산한다. 이러한 과정을 통해 사람의 초기 출입 방향과 현재 위치를 파악할 수 있다. 셋째, 연속된 프레임 간 클러스터 중심 좌표의 이동 패턴을 추적한다. 클러스터의 추적이 종료된 후에는 최종적으로 객체가 센서 중심선을 기준으로 미리 정의된 방향(예: BOTTOM → TOP)으로 이동했는지를 판단하여 'IN' 또는 'OUT' 출입 방향을 판별한다. 이러한 클러스터 추적 방식은 조도나 사물의 존재 여부와 무관하게 안정적인 출입 감지가 가능하며 비식별 데이터를 활용하여 시설 이용자의 프라이버시를 보호한다. [그림 2]는 실제 온도 분포 프레임을 수집하고 추적하는 과정을 보여주는 예시이다.



[그림 3] 관리자용 웹 인터페이스

2.3 조명 제어 및 모니터링부 구현

조명 제어 및 모니터링부는 Raspberry Pi를 중심으로 동작한다. Raspberry Pi는 ESP32로부터 UDP 프로토콜을 통해 출입 판별 결과를 수신하며 이를 바탕으로 실시간 재실 인원수를 갱신한다. 재실 인원수가 0명이면 조명 OFF, 1명 이상이면 ON으로 상태를 결정하는 조명 스위치 제어 로직을 수행한다. 조명의 실제 작동은 SG90 서보모터를 이용한 물리적 스위치 조작기를 통해 이루어진다. 서보모터가 기존 벽면의 토글스위치를 지정된 각도만큼 회전시켜 조작하는 방식으로 별도의 스마트 전등

설비 없이 기존 인프라에 적용할 수 있는 범용성을 확보했다. 또한 시설 관리자를 위한 React와 Next.js 기반의 웹 인터페이스를 구축하였다. Raspberry Pi는 조명 상태 및 출입 로그를 InfluxDB로 전송하며 관리자는 웹 대시보드를 통해 이를 실시간으로 모니터링할 수 있다. 관리자용 웹 인터페이스에는 자동/수동 조명 제어 모드 전환 및 원격 제어 기능을 제공하며 과거 조명 작동 현황 및 출입 인원 현황과 같은 시설 운영 시 활용되는 데이터 조회 기능을 제공하여 관리 편의성을 높였다.



[그림 4] 시스템 실증 실험

2.4 실험 및 결과

본 시스템의 성능 검증을 위해 실제 대학 강의실 환경에서 실증 실험을 진행하였다. [그림 4]와 같이 출입문에 센서를 설치하고 조명 스위치에 제어기를 부착한 결과 1초 이내의 응답 속도로 출입을 감지하고 조명을 안정적으로 제어함을 확인하였다. 특히 다수의 인원이 연달아 출입하는 상황에서도 높은 정확도를 보였으며 관리자 웹 인터페이스를 통해 모든 상태가 실시간으로 정상 확인되었다.

III. 결론

본 논문에서는 MLX90640 열화상 센서와 클러스터 추적 알고리즘을 이용해 출입 인원을 감지하는 IoT 조명 제어 시스템을 구현하였다. 서보모터를 이용한 물리적 스위치 조작 방식으로 기존 인프라에 쉽게 적용할 수 있도록 했으며 관리자용 웹 인터페이스를 통해 원격 모니터링 및 제어 기능 또한 확보하였다. 제안된 시스템은 비식별 데이터를 활용하여 프라이버시 문제를 해결하면서도 안정적인 재실 감지가 가능함을 검증하였다. 이를 통해 향후 조명 제어를 넘어 냉난방기(HVAC) 등 다양한 빌딩 설비와 연동되는 확장형 IoT 솔루션으로 발전할 수 있는 기술적 토대를 마련했다는 점에서 의의가 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. A. A. Prasetyo, et al., "Iot Based Smart Lighting Control System," *International Journal of New R&D*, vol. 8, no. 11, 2023.
- [2] D. Signoretti, et al., "Low-Cost Thermal Camera-Based Counting Occupancy Meter Facilitating Energy Saving in Smart Buildings," *Energies*, vol. 14, no. 15, Article 4542, 2021.