

실내 영상 기반 에너지 절감 조명 시스템 설계

이세현, 오승택, 임재현*

공주대학교

{bunkerbuster, ost73, *defacto}@kongju.ac.kr

Indoor Vision-based Lighting System Design for Energy Saving

Lee Se Hyun, Oh Seoung Taek, Lim Jae Hyun*

Kongju Univ.

요약

건물 내 조명의 에너지 소비가 증가함에 따라 자연광을 활용한 효율적인 조명 제어에 관한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 조도 변화를 정밀하게 파악하고, 조명을 효율적으로 제어하는 기술의 중요성이 부각되고 있다. 기존에는 센서를 다수 설치하여 조도를 측정하고 조명을 제어하는 방법이 일반적이었으나, 설치 비용과 공간 활용의 한계가 존재하였다. 다수 센서의 설치를 배제하기 위해 영상 데이터를 활용한 딥러닝 기반 조도의 분석 기법이 소개되었다. 그러나 센서를 배제한 환경에서 영상 기반 제어를 통해 에너지를 절감하는 시스템 조명 기술에 관한 연구는 거의 없었다. 본 연구에서는 자연광과 인공광으로 구성된 조명환경에서 다수의 센서를 대체하는 실내 영상 기반의 제어를 통해 에너지를 절감하는 시스템 조명을 제안한다. 자연광을 하나의 광원으로 간주, 다수의 광원이 적용된 환경에서 각 광원의 변화에 따른 실내 영상은 수집한 후 CNN 기반으로 학습하여 개별 조도맵을 생성하였다. 이후 개별 광원의 변화에 따른 조도맵의 영향을 분석하여 제어 지표를 도출한 후 실내조도 변화에 따른 적응적 에너지 절감 혼합 제어를 적용하였다. 성능 평가에서는 영상 기반 조명 제어를 적용하여 에너지 절감 효과를 검증하였다. 이를 통해 영상 기반 에너지 절감 조명 시스템이 센서 기반 조명의 제어 기술을 대체할 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

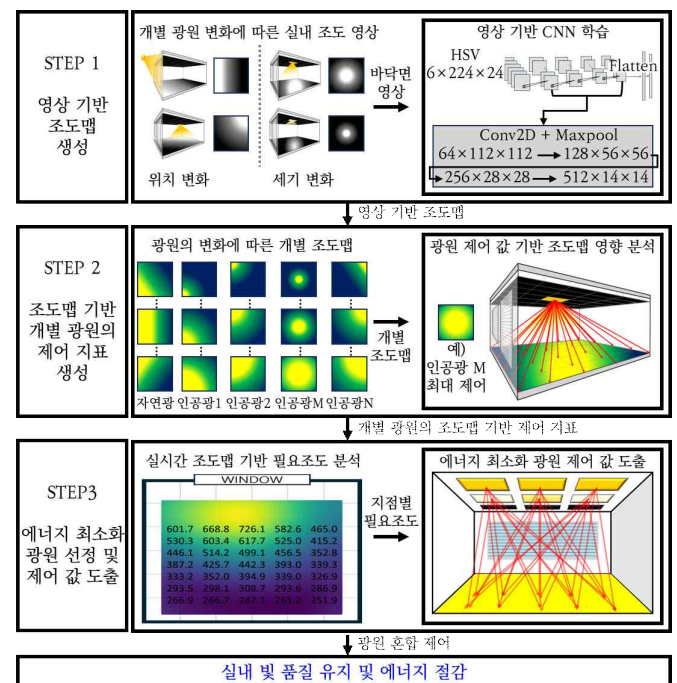
최근 건물 내 조명 에너지 소비가 증가함에 따라 자연광을 적극적으로 활용하고 인공광 사용을 최소화하려는 기술적 시도가 활발히 이루어지고 있다. 자연광은 시간 및 날씨에 따라 지속해서 변화하기 때문에, 이를 효율적으로 활용하기 위해서는 실내조도의 정밀한 분석과 이에 기반한 적응적 조명 제어가 필요하다. 기존에는 다수의 조도 센서를 설치하여 구역별 조도를 측정하고 인공광을 일률적으로 제어하는 방법이 일반적으로 사용되었다.[1] 그러나 이 방법은 센서 설치에 따른 비용 증가와 공간 활용의 제약으로 인해 확장성과 실용성에 한계가 있다. 또한, 고정된 센서 기반 접근 방식은 광원별 세기나 위치 변화에 따른 정밀한 조도 반응을 반영하기 어렵고, 실시간성 확보에도 제약이 따른다. 이러한 문제를 해결하기 위해 실내 영상을 활용하여 CNN 기반으로 조도맵을 생성하는 기술이 제안되었다.[2] 영상 기반 방식은 센서 설치가 불필요하여 공간 제약을 해소할 수 있으며, 영상 내 픽셀 단위의 정보를 활용해 조도 분포를 고해상도로 예측할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 복잡한 조명 구조를 학습 기반 모델링으로 다양한 환경에 유연하게 대응할 수 있다. 그러나 기존 연구들은 조도 예측에 초점을 맞추고 있어 영상 기반 조도 예측을 통해 센서를 대체하여 에너지를 절감 조명 시스템 개발한 사례는 없었다.

본 연구에서는 자연광과 인공광이 혼합된 실내조명 환경에서, 센서를 사용하지 않고 실내 영상만을 기반으로 에너지 효율성을 확보하는 조명 시스템을 제안한다. 다양한 광원의 위치 및 세기 변화에 따라 수집된 실내 영상을 CNN 기반으로 학습하여 조도맵을 구성하고, 광원별 조도 영향을 분석하여 제어 지표를 도출한다. 이를 기반으로 실시간 조도 변화에 적응하면서 기준 조도를 만족할 수 있는 최적 제어 값으로 조명을 제어하도록 설계한다. 이후 기존 센서 기반 일률 제어 방식과 비교 실험을 수행하여 센서 기반 조명 제어 기술을 대체할 수 있음을 검증하고자 한다.

II. 본론

2.1 영상 기반 에너지 절감 조명 시스템

본 연구는 자연광과 인공광이 복합적으로 작용하는 환경에서, 영상 기반 조도맵 생성을 통해 광원별 조도 영향을 분석하여 물리적 센서를 대체하면서도 에너지 절감을 달성하는 조명 제어 시스템을 제안하였다.



[그림 1] 에너지 절감 조명 시스템의 흐름도

그림 1은 실내 영상을 기반으로 조명을 제어하여 에너지 절감을 실현하는 제안 시스템의 전체 구조와 흐름을 단계별로 나타낸 것이다. 본 시스템은 총 세 단계(STEP 1~3)로 구성되었다.

STEP 1에서는 조도맵 예측의 기초 모델을 구성하였다. 개별 광원의 위치 및 세기 변화를 반영한 실내 영상을 수집한 후, HSV 색 공간으로 변환하여 CNN 모델에 입력하였다. 해당 영상으로부터 조도 특징을 학습하고 특정 광원의 제어 값에 따른 영상 기반 조도맵을 7 생성하였다.

STEP 2에서는 STEP 1에서 학습된 CNN 모델을 이용하여, 각 광원의 위치 및 세기 변화에 따른 조도맵을 예측하였다. 이는 단순한 조도 분포 예측을 넘어서, 제어 값 변화에 따른 조도 변화 반응을 포함하고 있다. 이를 통해 광원 제어 입력과 조도 반응 간의 관계를 모델링할 수 있으며, 실시간 제어를 위한 기준으로 활용하였다. 특히, 복수 광원이 동시에 작동할 경우의 중첩 효과까지 반영하기 위해 광원 간 상호작용도 함께 고려하였다. 이후 각 광원의 위치 및 세기 변화에 따라 실내 조도맵 영향을 분석하였고, 이는 실시간 제어 알고리즘에서 사용되는 제어 지표로 활용하였다.

STEP 3에서는 실시간 실내조도 분포를 분석하여 기준 조도를 충족하기 위한 위치별 조도량을 계산하였다. 조도 증가가 필요한 영역에는 밝기를 증가시키고, 과잉 조도 영역에는 밝기를 감소하여 에너지 소비를 절감하는 혼합 제어 방법을 설계하였다. 제어 값은 STEP 2에서 구축한 제어 지표를 기반으로, 각 광원의 조도 기여 특성을 반영하여 산출되었다. 이때 공간별 조도 기여 패턴과 시간대별 자연광 유입량을 반영한 동적 가중치 기반 제어 방식을 적용하였다. 조도맵은 영상 입력과 CNN 추론을 통해 실시간으로 갱신되며, 최신 조도 상태를 반영할 수 있도록 구성하였다. 이를 통해 기준 조도를 유지하면서 에너지 소비를 최소화할 수 있는 제어가 가능할 것으로 기대되며, 센서를 완전히 배제하고 영상 기반으로 조도 예측 및 제어를 수행할 수 있는 잠재력을 확인하였다. 제안한 시스템은 기존 센서 기반 제어 방식의 대안이 될 수 있으며, 설치 비용 절감, 공간 활용성, 확장성 측면에서 실용적인 장점을 제공할 수 있을 것으로 예상하였다.

2.2 성능 평가 실험 및 분석

제안된 시스템의 성능 평가를 위해 위도 36°, 경도 127°에 있는 K 대학 내 실험실(1층)에서 실험을 수행하였다. 30대(5행×6열)의 제어가 가능 조명과 영상 수집을 위한 카메라 모듈(Raspberry Pi Camera Module 3 Wide)을 천장 면에 설치하였다. 실험은 09시부터 18시까지 1시간 단위로 제안된 시스템을 적용하여 각 조명의 세기를 제어하였으며, 해당 방식은 실험군으로 설정하였다. 비교를 위해 동일 환경에서 조명을 고정 세기로 일률 제어하는 기존 방식을 대조군으로 설정하여 비교 분석을 수행하였다. 일반적인 사무 공간에서는 500 lux 이상의 조도가 요구되며, 정밀 작업 공간에서는 1000 lux 수준이 권장된다.[3] 이에 실험 A는 평균 조도 500 lux 유지 조건, 실험 B는 1000 lux 유지 조건에서 진행하였다. 다음 표 1, 2는 실험 A, B의 결과 데이터이며 그림 2는 이를 도식화한 것이다.

[표 1] 실험 A, B의 결과

시간	실험 A (500 lux)				실험 B (1000 lux)			
	대조군		실험군		대조군		실험군	
	평균 조도	소비 전력	평균 조도	소비 전력	평균 조도	소비 전력	평균 조도	소비 전력
09	499	102.99	500	86.76	1000	218.08	1000	189.17
12	501	67.96	500	55.95	996	181.39	1000	153.03
15	499	14.59	500	14.81	1000	129.68	1000	104.55
18	502	86.31	500	69.08	996	199.74	1000	167.49
결과	에너지 절감		-16.65%		에너지 절감		-15.73%	

실험 A에서 실험군은 대조군 대비 약 16.65%의 소비전력을 절감하였고, 실험 B에서도 약 15.73%의 절감 효과를 보였다. 모든 실험 조건에서 영상 기반 제어 시스템은 기존 일률 제어 방식보다 낮은 소비전력을 유지하면서 기준 조도를 유지하였다. 이를 통해, 제안 시스템이 센서 없이도 정밀한 조도 제어와 에너지 효율을 동시에 달성할 수 있으며, 기존 센서 기반 제어 방식의 실용적인 대안으로 기능할 수 있음을 확인하였다.

III. 결론

본 연구에서는 실내 영상을 기반으로 조도맵을 생성하고 이를 활용하여 광원의 세기를 최적 제어함으로써 에너지 소비를 절감하는 조명 제어 시스템을 제안하였다. 자연광을 하나의 독립된 광원으로 간주하고, 다양한 인공광 조합에 따른 실내조도 변화를 학습하여, 광원의 위치 및 세기 변화에 따른 영상 기반 조도맵을 구성하였다. 이후, 각 광원의 제어 값 변화에 따른 조도 기여 정도를 분석하고, 이를 바탕으로 실내조도 변화 패턴을 모델링하여 광원별 제어 지표를 도출하였다. 최종적으로, 실시간 조도맵을 기반으로 기준 조도(500 lux 또는 1000 lux 등)를 만족하면서도 에너지를 절감하는 최적의 제어 값 조합을 도출하였다. 성능 평가 결과, 제안된 시스템은 기준 조도를 유지하면서도 기존 일률적 제어 방식 대비 최대 약 16%의 에너지 절감 효과를 나타냈다. 이는 영상 기반 조도 예측 및 조명 제어가 센서 기반 시스템을 대체할 수 있는 실용적 대안이 될 수 있음을 확인하였다. 이에 따라 설치 비용과 유지 보수의 비용을 절감할 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 자연광의 방향성과 분포를 정밀하게 분석하고, 이를 영상 기반 제어 알고리즘에 실시간으로 반영할 수 있는 고도화된 모델을 개발하여 시스템으로 구현할 예정이다.

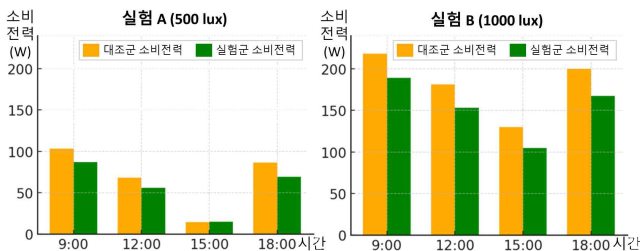
ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(RS-2019-NR040074)

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(RS-2023-00245425)

참 고 문 헌

- [1] Jettanasen, C., Thongsuk, S., Sottiyaphai, C., Songsukthawan, P., Chiradeja, P., Lertwanitrot, P., and Ngaopitakkul, A., "An approach to energy conservation in lighting systems using luminaire-based sensor for automatic dimming," Scientific Reports, vol. 15, no. 1, p. 3302, 2025.
- [2] 이유빈, 이세현, 오승택, 임재현, "딥러닝 모델 연계 실내 상세 조도맵의 생성 방법," 한국인터넷정보학회, 제25권 제2호, pp. 69 - 70, 2024년 10월.
- [3] 대한전기협회, 건축전기설비설계기준, 대한전기협회 출판부, 2020.



[그림 2] 실험 A, B의 소비전력 비교