

디지털 카메라 기반 등명기 광도측정 시스템 성능 향상에 관한 연구

이충진, 채정근, 박종현, 이제형, 이동엽

한국항로표지기술원

cjlee@katon.or.kr, jgchae@katon.or.kr, jpark2020@katon.or.kr, leejh@katon.or.kr, dy1624@katon.or.kr

A Study on the performance enhancement of a beacon light luminous intensity measurement system using a digital camera

Chungjin Lee, Jeonggeun Chae, Jonghyun Park, Jehyoung Lee, Dongyeob Lee

Korea Institute of Aids to navigation.

요 약

본 논문은 디지털 카메라를 활용하여 실외 환경에서 광도를 측정할 수 있는 시스템을 개선한 연구를 다룬다. 기존 카메라 기반 측정 방식은 고휘도 광원에서 이미지 센서의 포화로 인해 측정 정확도가 저하되는 문제가 있었다. 이를 해결하기 위해 ND 필터를 도입하여 센서에 도달하는 광량을 조절함으로써 포화 현상을 완화 하였다. 시뮬레이션 결과, ND-step 128 이하에서는 약 4~6% 수준의 오차가 확인되었으며, ND-step 256 및 512에서는 8~14%의 결과를 나타냈다. 성능 저하는 단순한 잡음 뿐만 아니라 ND-step 설정 위치와 저투과율 조건에서의 필터 특성에 따른 영향으로 분석된다. 본 연구는 ND 필터 적용을 통해 디지털 카메라 기반 광도측정의 신뢰성을 향상시킬 수 있음을 확인하였으며, 향후 실내 또는 실외 실험을 통해 보다 정밀한 검증과 정확성 향상을 위한 추가 연구를 진행할 예정이다.

I. 서 론

대한민국 해양수산부에서는 항로표지법 제38조 항로표지 장비·용품등의 검사에 근거하여 정기적인 검사를 수행함으로써 항해자의 안전을 확보하고 있다. 특히, 빛을 이용하여 선박의 위치, 항로, 위험물의 존재 등을 표시하는 항로표지의 성능 검사는 주로 광도를 기준으로 수행된다[1][2]. 일반적으로 광도는 실외 환경에서 측정할 수 없기 때문에 표준광원이라고 불리는 보조광원을 사용하여 휘도를 측정한 뒤 비례식을 사용해 광도로 변환하는 방법을 사용한다[3]. 검사 과정에서는 분광방사계를 이용하여 휘도를 측정하고, LabVIEW 기반의 광도 변환 및 분석 프로그램을 통해 결과를 검증한다. 이러한 측정 시스템의 편의성을 개선하기 위해 디지털 카메라를 활용하여 실외 환경에서 광도를 측정할 수 있는 시스템을 개발했다[4]. 하지만, 디지털 카메라를 활용한 측정 시스템은 상대적으로 편리하게 측정을 수행할 수 있지만, 광원의 세기에 따라 큰 오차가 발생할 수 있다. 이는 카메라 이미지 센서가 픽셀의 풀 웰 용량(Full Well Capacity)을 초과하는 광자를 수용할 경우 포화가 발생하여 선형적인 광도 응답 특성이 손실되고, 결과적으로 측정 정확도가 저하되기 때문이다. 이러한 과도한 광자 유입으로 인한 포화 문제는 ND(Neutral Density) 필터를 사용하여 센서에 도달하는 광량을 적절히 감소시킴으로써 효과적으로 완화할 수 있다. 본 논문에서는 ND 필터를 사용하여 디지털 카메라 기반의 광도측정 시스템의 성능을 개선하였으며, 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다.

II. 광도측정 알고리즘 개선

실외 환경에서 디지털 카메라를 활용하여 광도를 측정하기 위해 이전 연구에서는 암전류(Dark Current), 렌즈 음영(Uniformity) 및 선형성(Linearity) 교정을 수행했다[4]. 본 논문에서는 광원의 빛이 매우 큰 경우 광자가 포화되지 않도록 ND 필터를 적용하는 시스템으로 개선하였으며, 전체 신호처리 블록 다이어그램은 그림 1과 같다.

ND 필터는 카메라 렌즈에 부착하여 사용하는 방식으로, 필연적으로 투과율의 변화가 발생한다. 따라서, 변화된 특성을 고려한 추가적인 교정 및 보정이 요구된다.

본 논문에서 사용한 카메라는 Canon EOS R5이며, Canon RF50mm F1.8 STM 렌즈를 사용한다. 또한, ND 필터로는 K&F사의 Nano-X Variable ND32-512 모델을 사용했다. 가변 ND 필터는 편광 성질을 이용한 필터로 1장의 편광 필터를 고정된 상태에서 다른 한 장의 필터를 연속적으로 회전하여 투과율 1/32~1/512 까지 조정 가능한 필터이다. 따라서, ND-step 32, 64, 128, 256, 512 각각의 교정 및 보정이 필요하다.

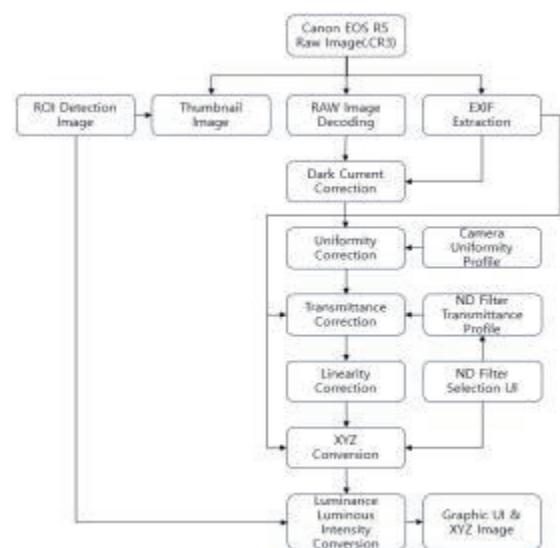


그림 1. 신호처리 블록 다이어그램

Fig. 1. Signal Processing Block Diagram

ND Filter Selection User Interface를 통해 입력된 CR3 영상 촬상 시 선택한 ND 필터 종류 및 ND-step 정보를 입력 받아서 대응되는 ND Filter Transmittance Profile 영상을 입력받는다. CR3 영상의 노출시간 정보를 이용하여 화소 단위 투과율 보정을 Transmittance Correction 블록에서 처리하며, 선정된 ND 필터에 대응되는 LMSE 교정 매트릭스에 의해 XYZ 변환을 수행한다. 이렇게 얻은 이미지를 통해 광도 특성을 분석할 수 있다.

ND 필터의 교정은 먼저 Reference 영상의 10회 평균 영상(I_{ref}) 및 각 필터 설정 별 10회 영상의 평균(I_2)을 구하고, 각 영상의 촬상 시 사용된 노출시간(E_2)을 이용하여 각 필터 평균 영상 Reference 촬영 시 노출시간(E_1)으로 환산한 영상(I_1)을 구한다.

$$I_1 = I_2 * E_1 / E_2 \quad (1)$$

필터별 투과율 영상(T)을 수식(2)와 같이 피사체 및 조명의 nonuniform 프로파일을 제거하여 구한다.

$$T = I_1 / I_{ref} \quad (2)$$

해당 투과율 영상은 매우 어두워 각 ND-step 별로 32, 64, 128, 512배로 증폭하여 아래 그림 2와 같이 정규화로 시각화하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 ND 필터 종류별로 Uniformity 특성이 다름으로 각 ND 필터 설정에 따라 화소별 투과율 보정이 필요함을 알 수 있다.

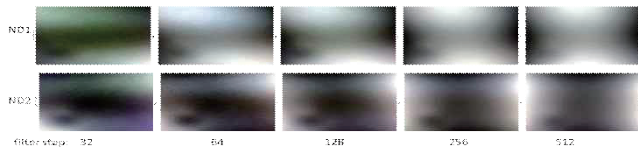


그림 2. ND-step 별 영상의 정규화된 투과율 영상
Fig. 2. Normalized transmittance image for each ND-step

ND 필터 투과율 교정 이후 추가적인 컬러교정(rawRGB to XYZ)이 필요하다. RGB 투과율이 ND 필터에 의해 변동성이 발생함으로 각 필터 설정에 최적화된 LMSE 교정 matrix가 필요하다. 이를 위해 그림 3과 같은 실험 환경을 구성하여 McBeth Color Checker를 카메라(Canon EOS R5) 및 휘도계(CS1000)로 측정하여 LMSE 교정 matrix를 획득했다.



그림 3. McBeth Color Checker를 이용한 측정 환경
Fig. 3. Measurement environment using a McBeth Color Checker

III. ND 필터 교정 성능 검증

ND 필터 적요에 따른 투과율과 Uniformity 교정 후 성능을 ND 필터 적용하기 전의 Reference 성능과 비교하였다. 그림 4의 좌측 그래프는 ND 필터 없이 교정한 결과로 McBeth Color Checker 24가지의 색의 XYZ 평균 오류를 CS1000으로 측정된 이상적 XYZ에 근사한 값과 비교한 색차로 XY에서는 평균 오차 4%, Z에서는 잡음의 영향과 UV 성분에 의한 왜곡 등으로 7.6% 수준을 나타낸다.

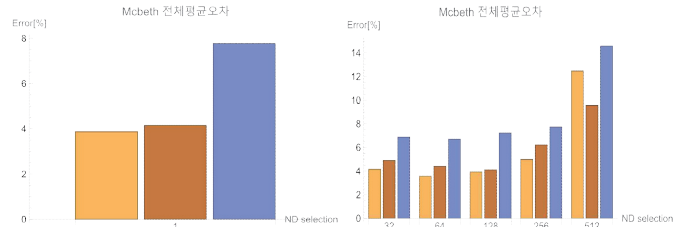


그림 4. 측정 결과 (좌) ND 필터 미적용, (우) ND 필터 적용
Fig. 4. Measurement Results (Left: without ND filter, Right: with ND filter)

우측 그래프는 ND 필터에 대해 설정된 ND-step들을 측정된 결과를 ND 필터의 컬러 및 투과율 교정 후 CS1000 XYZ와 비교한 결과이다. ND-step 128 이하에서는 전반적으로 ND 필터 미장착 Reference와 비교 시 매우 유사한 결과를 보여주고 있으나, ND-step 256 및 512 설정에서는 투과율 교정 시 고증폭으로 인한 잡음의 영향으로 8~14% 사이로 높아 짐을 확인했다.

IV. 결론

본 논문에서는 디지털 카메라를 활용하여 실외 환경에서 광도를 측정할 수 있는 시스템을 개선하였다. 특히, 광원의 세기가 매우 커서 광자 포화로 인해 측정이 불가능한 환경을 개선하고자 ND 필터를 사용하여 측정이 가능하도록 개선하였으며, 시뮬레이션을 통해 ND-step 128 이하에서는 4~6% 수준을 확인하였으며, ND-step 256, 512에서는 8~14% 사이의 결과를 얻었다. 성능 열화는 비단 잡음 뿐만 아니라 육안으로 설정한 ND-step의 위치에 대한 영향도 있다. 또한, 저 투과율로 갈수록 미세한 설정 오류에 따른 변동성이 커지는 ND 필터 고유 속성에 따른 것으로 사료된다. 향후, 실내 또는 실외 측정 실험을 통해 더 정밀한 결과를 확보할 예정이며, 측정의 정확성을 높이기 위한 연구를 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 해양수산부의 재원으로 "25년도 항로표지 장비·용품 등 연구개발사업"의 지원을 받아 수행된 연구임(B0070111000641).

참 고 문 헌

- [1] 항로표지 장비·용품의 기능 및 규격 기준.
- [2] 항로표지 장비·용품 검사기준.
- [3] 박제섭, 최영중, "항로표지 광파측정 업무의 효율화 방안," 한국항해항만학회 학술대회논문집, 327-330, 2014, .
- [4] 이충진, 채정근, 박종현, 김현진, 이동엽, "광파표지 실외 광도측정 시스템 개발," 한국통신학회 추계종합학술발표회, 648-649, 2024, .