

픽셀 비선형성 모델을 기반으로 한 영상센서 불균일 특성 보정

김영선*, 공종필**, 허행팔***, 박종억****, 용상순*****

CCD Non-uniformity Correction Method based on Pixel
Non-Linearity Model

Youngsun Kim*, Jong-Pil Kong**, Haeng-Pal Heo***, Jong-Euk Park****, Sang-Soon Yong*****

Abstract

All pixels of image sensor do not react uniformly when the light of same radiance enters into the camera. This non-uniformity has a direct influence on the image quality. However we can overcome it by calibration process under the special test-setup. Usually it is used the algorithm to get the correction coefficients under the specific illumination condition. But, this method has drawback in the very low or very high illumination due to pixel non-linearity. This paper describes the robust algorithm, which calculates the correction coefficients based on the pixel non-linearity model, against the whole radiance. The paper shows the non-uniformity test results with the own camera and the specified test equipments as well. The results shows the best performance over the entire radiance when this method is applied.

초 록

균일한 광량의 빛이 카메라에 입력되었을 때 카메라 영상센서 각 픽셀은 이상적으로는 균일한 응답을 보여주어야 하지만 실제로는 그렇지 않다. 이러한 픽셀의 불균일 응답 특성은 영상품질에 직접적으로 영향을 미치지만, 고정된 형태의 잡음이므로 보정과정을 통해서 잡음을 제거할 수 있다. 영상센서 불균일 보정 방법은 특정 광량에서의 기준값만을 가지고 보정계수를 구하는 방법 등을 사용하곤 했지만, 센서의 비선형성으로 인하여 신호가 작은 경우, 혹은 반대로 아주 큰 경우에는 보정 효과가 크지 않다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 영상센서의 비선형 특성을 고려하여 픽셀 불균일 보정계수 계산하는 방법을 기술하고 자체 구현한 카메라와 별도의 시험셋업을 이용하여 불균일도 시험을 수행하여 알고리즘을 검증하였다. 시험결과는 비선형성 모델을 기반으로 한 보정 알고리즘을 적용했을 때, 모든 광량에서 가장 좋은 성능을 보여주었다.

키워드 : 픽셀응답불균일성(PRNU), 어둡신호불균일성(DSNU), 비선형(non-linearity),
영상센서(image sensor), 불균일성 보정(non-uniformity correction), 픽셀(pixel)

접수일(2009년12월21일), 수정일(1차 : 2010년 5월 20일, 2차 : 2010년 6월 10일, 게재 확정일 : 2010년 7월 1일)

* 3호답재체팀 /yskim1203@kari.re.kr

** 3호답재체팀 /kjp123@kari.re.kr

*** 3호답재체팀 /hpyoung@kari.re.kr

**** 3호답재체팀 /pje@kari.re.kr

***** 3호답재체팀 /ssyong@kari.re.kr

1. 서 론

균일한 크기를 가진 빛이 카메라에 입력되었을 때 카메라 영상센서 각 픽셀은 이상적으로는 균일한 응답을 보여주어야 하지만 실제로는 그렇지 않다. 이러한 불균일 응답특성은 재료 특성, 픽셀 크기, 도핑 밀도, 코팅 두께 차이와 같은 픽셀 자체의 특성과 반사경, 구조체, 렌즈와 같은 광학모듈의 전달도 특성 등에 의하여 발생한다^{1,2)}. 센서의 불균일 특성은 영상품질에 직접적으로 영향을 미치는데, 라인 영상센서나, TDI(Time Delay and Integration) 센서를 사용하는 경우는 영상에 고정된 줄무늬 형태의 잡음으로 보이게 된다³⁾.

영상센서의 불균일 응답 특성은 고정된 형태의 잡음이므로 특정 시험셋업에서 보정 알고리즘에 의해 획득한 보정계수를 이용하여 제거할 수 있다. 영상센서의 불균일 특성은 DSNU(Dark Signal Non-Uniformity), PRNU(Photo Response Non-Uniformity) 특성으로부터 기인한다. 픽셀의 불균일 특성은 픽셀의 광량에 대한 선형 특성과 관계가 있다⁴⁾. 이상적인 센서는 광량에 대하여 선형특성을 가져야 하지만, 증폭기 특성, 픽셀 자체 특성 등으로 광량에 대하여 비선형성이 존재한다. 이러한 센서의 비선형성은 픽셀의 불균일 특성에도 영향을 미쳐, 광량에 따라서 불균일 특성이 달라지게 된다. 기존의 영상센서 불균일 보정 방법은 특정 광량(일반적으로 포화레벨의 50% 정도)에서의 기준값만을 가지고 보정계수를 구하는 방법 등을 사용하곤 했지만, 센서의 비선형성으로 인하여 신호가 작은 경우, 혹은 반대로 아주 큰 경우에는 보정 효과가 크지 않다. 따라서, 본 논문에서는 고주파 성분을 갖는 영상센서의 불균일 특성을 보정하기 위하여, 영상센서의 비선형성 모델을 기반으로 한 DSNU와 PRNU의 보정계수 계산하는 방법을 제시하고, 자체 구현한 카메라와 광학 시험 장치를 이용하여 알고리즘을 검증하고 그 결과를 기술하고자 한다.

2. 온보드 영상처리 과정

영상 불균일 보정은 영상데이터 수신 전 카메라 내부에서 수행할 수도 있고 영상수신이 완료된 후 영상처리 과정에서 보정할 수도 있다. 그러나 카메라 내부에서 영상 압축을 수행하는 경우 고주파 성분이 제거될 수 있으므로 최상의 영상 품질을 얻기 위해서는 온보드(On-board)에서 불균일 보정을 수행하는 것이 바람직하다. 이를 위해, 카메라는 불균일 보정계수 테이블을 관리하는 메모리를 가져야하고, 내부 디지털 프로세싱을 수행할 수 있는 로직을 포함하여야 한다.

카메라는 온보드 디지털 프로세싱과정에서 어둡신호 보정(Dark Signal Correction), 어둡신호 불균일 보정(DSNU Correction), 픽셀응답 불균일 보정(PRNU Correction), 넬슨 보정 과정을 거쳐 압축 과정 등을 수행한다. 그림1은 카메라의 온보드에서 수행하는 영상데이터 프로세싱과정을 보여준다.

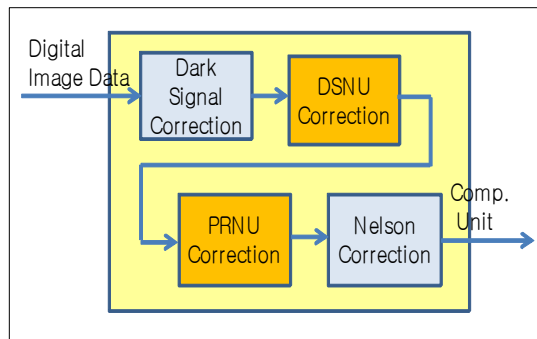


그림 1. 카메라전자 온보드 데이터 프로세싱

일반적으로 영상센서는 활성픽셀(Active Pixel) 이외에 센서 내부 열에 의하여 발생하는 어둡전류(Dark Current)로 인한 어둡신호(Dark Signal)를 보정을 위하여 임의로 빛을 차폐한 어둡픽셀(Dark Pixel)이나, 출력포트의 쉬프트레지스터 값을 출력하는 프리픽셀(Prefixel)을 가지고 있다. 카메라 시스템은 이러한 보정 픽셀을 이용하여 필터링과 어둡신호 보정을 수행한다. 어둡신호 보정 방법으로는 잡음을 줄이기 위하여 현재 라

인뿐만 아니라, 그전 여러 라인의 데이터를 이용하는 방법 등을 고려할 수 있다.

카메라는 내부 프로세싱 과정에서 어둡픽셀 보정을 수행한 후에 DSNU 보정 과정을 수행한다. DSNU 보정은 픽셀간의 불균일 특성을 보정할 뿐만 아니라, 광량에 대하여 영점교차(Zero-crossing)을 하도록 해, 시스템의 선형성을 향상시킬 수 있다.

PRNU 보정은 모든 픽셀에 대하여 각 픽셀 보정 계인(gain)을 곱해주어 균일한 빛 에너지에 대하여 모든 픽셀이 동일하게 응답하도록 한다. DSNU 및 PRNU 보정과정은 식(1)과 같이 요약할 수 있다.

$$P_{corr,i} = (P_i - DSNU_i) \times PRNU_i \quad (1)$$

여기서 P_i 는 어둡신호 보정을 거친 픽셀 데이터이고, $P_{corr,i}$ 는 DSNU 및 PRNU 보정을 수행한 이후의 픽셀 값이다.

넬슨보정(Nelson Correction)은 비정상적으로 응답으로 픽셀을 제거하는 방법이다. 보통 이러한 픽셀은 이웃픽셀 값으로 대체한다.

3. 영상센서 픽셀 불균일 보정

영상센서의 불균일 보정 성능은 픽셀 및 카메라 전자 특성과, 보정을 위한 시험 셋업, 보정 알고리즘 등에 따라 달라질 수 있다. 본 논문에서는 일반적인 보정 알고리즘인 특정 광량에서 보정계수를 획득하는 방법과, 영상센서의 비선형성 모델에 기반한 방법을 기술한다.

3.1 특정광량 측정값 이용방법

이 방법은 간단한 방법으로 DSNU 보정계수와, PRNU 보정계수를 별도의 다른 셋업에서 계산한다. 즉, 어둡환경에서 DSNU 보정계수를 획득하고 특정 광량환경에서 PRNU 보정계수를 구하는 방법이다.

3.1.1 DSNU 계산

DSNU 보정 계수를 계산하기 위해서는 어떠한

빛도 없는 어두운 환경에서 데이터를 획득해야한다. 그리고 센서 잡음을 없애기 위해 500-1000라인 정도의 데이터를 획득하여 그 평균값을 이용한다. DSNU 보정계수 획득은 어둡전류에 의한 영향을 없애기 위해 어둡신호 보정 과정을 활성화(enable)한 상태에서 수행한다. 식(2)는 픽셀별 DSNU 보정계수 획득식을 보여준다.

$$DSNU_i = \frac{1}{n_s} \times \sum_{s=1}^{n_s} P_{i,s} \quad (2)$$

여기서 n_s 는 샘플 수, $P_{i,s}$ 는 어둡신호 보정을 거친 i 번째 픽셀의 값을 의미한다.

3.1.2 PRNU 보정계수 계산

PRNU 보정계수를 획득하기 카메라에 특정 광량을 전 센서 영역에 균일하게 입력하여야 한다. 광량으로는 일반적으로 포화레벨의 50%의 균일 광량을 카메라에 입사하여 보정계수를 획득하기도 하지만, 카메라 운영 개념 및 신호레벨 분석 결과를 이용하여 광량을 계산하기도 한다⁵⁾.

PRNU 보정은 어둡신호 보정과 DSNU 보정 과정을 활성화한 상태에서 수행한다. PRNU 보정계수 획득은 아래와 같이 순차적인 과정을 통해서 수행한다.

(1) 픽셀 신호 획득

식(3)은 각 픽셀의 신호 획득과정을 보여준다.

$$\mu_i = \frac{1}{n_s} \times \sum_{s=1}^{n_s} P_{DSNU,i,s} \quad (3)$$

여기서 μ_i 는 획득한 픽셀별 평균값, n_s 는 샘플 수, $P_{DSNU,i,s}$ 는 어둡신호와 DSNU 보정을 거친 i 번째 픽셀의 값을 의미한다.

(2) 기준 신호값 계산

$$Norm = \frac{1}{n_p} \times \sum_{i=1}^{n_p} \mu_i \quad (4)$$

여기서, $Norm$ 은 PRNU 보정계수 계산을 위한 기준 신호값, n_p 는 센서의 총 픽셀 수이다. 기준 신호값은 식(4)와 같이 라인평균값을 이용할 수도 있고, 시스템에 따라서는 라인 최대값을 이용하기도 한다.

(3) PRNU 보정계수 계산

$$PRNU_i = \frac{Norm}{\mu_i} \quad (5)$$

각 픽셀별로 식(2)와 식(5)를 적용하여 결정된 PRNU 보정계수를 카메라 온보드 메모리에 업로드하여 픽셀 불균일성을 실시간 보정할 수 있다.

3.2 픽셀 비선형성 모델 이용방법

3.1절과 같이 픽셀의 비선형성을 고려하지 않은 방법은 특정 광량레벨에서는 보정효과가 크지만, 픽셀마다 비선형성이 존재하므로 신호가 작은 경우, 혹은 반대로 아주 큰 경우에는 보정효과가 크지 않다. 보정계수 획득에 센서의 비선형 특성 모델을 적용한다면 더욱 큰 불균일성 보정 효과를 기대할 수 있다. 이 방법에서는 DSNU, PRNU를 한꺼번에 구한다. 이 방법은 서로 다른 광량에서 측정값을 얻을 필요가 있고, 이를 위해 카메라의 노출시간을 조절할 수도 있고, 광원의 광량을 조절하는 수도 있다. 카메라의 노출시간을 조절하는 방법은 매우 정확하게 제어할 수 있지만, 어둠신호와 같이 노출시간에 따라 달라지는 신호의 영향을 받을 수 있다. 반면 광원의 광량을 조절하는 방법은 보다 직접적인 방법이지만, 상대적으로 정밀한 제어가 어렵고, 광량의 변화로 인한 스펙트럼 변화, 포토티터 측정오차가 존재한다. 본 논문에서는 광원의 광량을 조절하는 방법을 사용하였다.

이상적인 영상센서 픽셀은 빛 에너지에 대하여 선형적으로 반응하지만, 실제 센서는 비선형 오차가 존재한다⁶⁾. 픽셀의 비선형 특성을 수식적으로 모델링할 수 있으며, 보통 1차식의 형태로 응답 특성을 모델링 한다. 특히 본 논문에서 사용한 센서 CCD(Charge Coupled Device)는 선형성이 매우 좋아 1차식의 모델링이 무방하다. 픽셀의 노출시간에 대한 광응답 모델링은 다음과 같다.

$$P_i(t) = m_i \times t + n_i \quad (6)$$

여기서 t 는 노출시간 혹은 광량을 의미하고 m_i

는 픽셀별 계인, n_i 는 픽셀 오프셋을 의미한다. 그림2는 노출시간에 따라 픽셀의 광응답 특성을 보여준다.

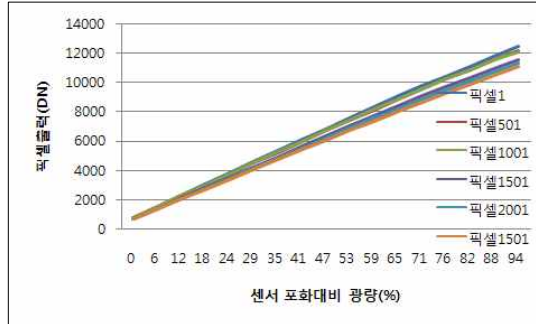


그림 2. 노출시간에 따른 픽셀 광응답 특성

픽셀 비선형 모델을 이용한 방법은 DSNU 보정계수와, PRNU 보정계수를 같은 셋업에서 한꺼번에 계산한다. 이 과정은 어둠신호 보정을 활성화한 상태에서 수행한다. DSNU 보정계수와 PRNU 보정계수 획득은 아래와 같이 순차적인 과정을 통해서 수행한다.

(1) 광량에 따른 영상데이터 획득

포화레벨 10% - 100%까지 입사 광량을 조정하여 n 스텝에서 영상데이터를 획득한다. 어둠환경(센서 포화레벨 0%)에서 측정값을 이용하지 않은 이유는 이 영역에서 픽셀의 응답 비선형성이 크기 때문이다.

(2) 픽셀별 응답계수 계산

각 픽셀별로 응답계수를 구한다. 응답계수로 광량에 대한 기울기 m 과 오프셋 n 을 계산하며, 식(6)의 픽셀 광응답 특성 모델을 이용한다. 기울기 m_i 와 오프셋 n_i 는 식(6)에서 보여주듯 미지수가 2개인데 비하여 측정데이터 n 개로 더 많으므로 최소자승법을 적용할 수 있다. 최소자승법은 오차의 제곱을 최소화한다⁷⁾. 식(7)은 최소자승법을 사용하여 계산한 광응답 직선의 기울기와 오프셋이다.

$$m_i = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n y_i x_i \right) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$n_i = \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right)}{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (7)$$

여기서 n 은 총 스텝 수를 의미하고, x, y 는 각 스텝의 광량 및 카메라 출력값을 의미한다.

(3) DSNU 보정계수 계산

DSNU 보정계수는 식(7)에서 계산한 오프셋을 적용하며 식(8)과 같다.

$$DSNU_i = n_i \quad (8)$$

(4) 기준 신호값 계산

픽셀의 비선형 모델을 이용한 방법에서 PRNU 보정계수를 계산하기 위한 기준 신호값은 식(9)와 같이 각 픽셀의 광응답 직선 기울기 평균값을 사용한다.

$$Norm = \frac{1}{n_p} \times \sum_{i=1}^{n_p} m_i \quad (9)$$

여기서, n_p 는 센서의 총 픽셀 수이다. 기준 신호값은 식(9)와 같이 라인평균값을 이용할 수도 있고, 시스템에 따라서는 라인 최대값을 이용하기도 한다.

(5) PRNU 보정계수 계산

각 픽셀별 PRNU 보정계수는 식(9)의 기준 신호값을 이용하여 계산하며 식(10)과 같다 계산방법을 보여준다.

$$PRNU_i = \frac{Norm}{m_i} \quad (10)$$

여기서, m 는 각 픽셀 응답직선 기울기이다.

3.3 보정계수 획득시험

영상센서의 불균일 보정 성능은 보정 알고리즘뿐만 아니라 보정획득을 위한 시험셋업에 따라 달라진다. 보정계수 획득시험에서 무엇보다도 균일한 빛을 공급하는 것이 필요한데, 이를 위해 적분구(Integrating Sphere)를 이용하였다. 이밖에도 영상데이터 획득을 위한 프레임그래버를 탑재한 시험 장치 등이 필요하다. 그림3은 보정계수 획득을 위한 시험 셋을 보여준다.

본 논문에서는 특정광량 측정값 방법과 영상센서 비선형성 모델에 근거한 방법, 이 두 경우 모두에 대하여 보정계수를 구하였다. 특정광량 측정값 방법에서는 어둠환경에서 DSNU 보정계수를 획득하였고, 센서 포화레벨의 50%레벨에서 PRNU 계수를 계산하였다. 비선형 특성 모델 이용방법에서는 센서 포화레벨 10%에서 100%의 6단계, 즉, 10%, 30%, 50%, 70%, 90%, 100%에서 측정데이터를 획득하였다. 각 단계에서 측정값은 잡음 효과를 줄이기 위해 각 광량에서 500라인의 데이터를 샘플링 하였다. 또한 적분구 크기의 제한으로 센서 모든 영역에 균일한 빛 에너지를 제공하지 못해 픽셀 251~4500 픽셀 값만을 이용하여 보정계수를 구하였다. 표1은 계산한 불균일 보정 테이블 예를 보여준다.

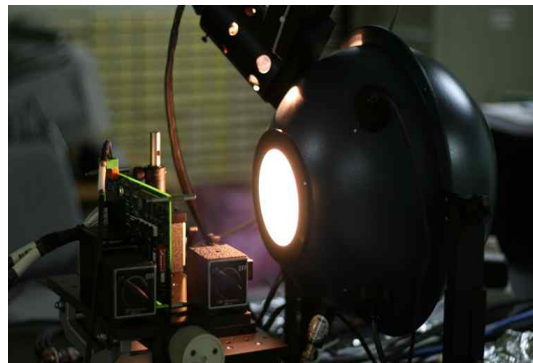


그림 3. 적분구를 이용한 불균일 보정계수 획득시험 셋업

표 1. 획득한 DSNU, PRNU 보정테이블-예

| 픽셀번호 | DSNU 계수 | PRNU 계수 |
|------|---------|---------|
| 251 | 31.9282 | 0.9966 |
| 252 | 31.7896 | 1.0012 |
| 253 | 31.9130 | 0.9985 |
| 254 | 31.8954 | 0.9987 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 2250 | 31.9385 | 0.9960 |

4. 카메라 픽셀응답 불균일도 시험

제시한 알고리즘은 카메라 불균일도 시험을 통해 검증하였다. 불균일도 시험결과는 불균일 보정을 수행하지 않은 경우와, 3절에서 제시한 두 방법을 적용한 경우를 비교하였다.

4.1 픽셀 불균일 시험 환경 및 계산식

픽셀 불균일도 시험은 불균일 보정계수를 구할 때의 시험환경과 거의 동일한 상태에서 수행하였다. 시험셋업은 그림3과 같이 적분구를 통하여 센서 영역에 균일한 빛 에너지가 도달하도록 하였고 프레임그래버를 통하여 영상데이터를 획득하였다. 표 2는 시험을 위한 센서, 시험조건 및 파라미터를 보여준다. 광량에 따라 불균일 특성이 달라지므로 광량을 조절하여 각 단계에서 시스템의 불균일 특성을 살필 필요성이 있다. 논문에서는 광량을 영상센서 포화레벨의 0%, 10%, 30%, 50%, 70%, 90%, 100%로 조절하여 각 레벨에서의 불균일 특성을 살펴보았다.

표 2. 픽셀 불균일도 시험을 위한 센서 및 시험 파라미터

| | |
|---------|--|
| 센서 | Eastman Kodak KLI-5001 라인 CCD |
| 라인 레이트 | 2870 lines/sec |
| VP 조정 | 게인 : ×1, 오프셋 : 0mV |
| 라인 샘플 수 | 500 |
| 픽셀 영역 | 501픽셀 ~ 4500픽셀 |
| 온도 | 상온 |
| 광량 조절 | 영상센서 포화레벨의 0%, 10%, 30%, 50%, 70%, 90%, 100% |

픽셀 불균일 특성의 척도인 시스템 불균일도의 계산식은 개발자 혹은 시험자에 따라 달라질 수 있으나, 일반적으로 식(11)과 같은 식을 사용한다¹⁾.

$$DSNU = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_{min})^2}{n_p}} (DN)$$

$$PRNU = \frac{(P_{max} - P_{min})}{P_{average}} \times 100(\%) \quad (11)$$

여기서 P_{max} 는 라인에서 최대 출력 값, P_{min} 은 라인에서 최소 출력 값, $P_{average}$ 는 라인의 픽셀 평균값을 의미한다.

4.2 픽셀 불균일 시험결과

그림4는 센서 포화레벨 50%의 균일한 광량에서 불균일 보정을 한 경우와 픽셀 비선형 모델을 이용한 방법으로 획득한 불균일 보정계수를 적용한 경우의 불균일성 시험 결과이다. 시험결과는 불균일 보정을 수행하면 불균일 특성을 획기적으로 제거할 수 있음을 보여준다.

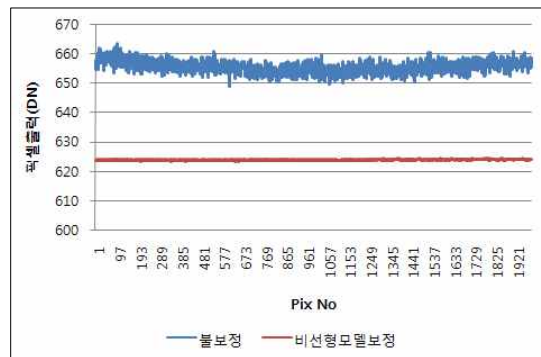


그림 4. 비선형모델 보정계수를 이용한 불균일도 시험(포화레벨 50%)

표3과 그림5는 시스템 불균일도 시험결과를 요약하여 보여준다. 표와 그림은 불균일 특성을 보정하지 않은 경우, 특정광량 방법을 이용한 경우와 픽셀 비선형모델 방법을 사용한 경우에 대하여 불균일도 측정 결과를 비교하여 보여준다. 시험결과는 비선형

모델을 적용한 방법이 모든 광량에서 안정적이고 고르게 불균일 특성을 보정할 수 있음을 보여준다. 특히 이 방법은 아주 낮은 광량과 아주 높은 광량에서 좋은 결과를 갖는다.

표 3. 광량대비 픽셀 불균일도 시험 결과

| 광량 (포화대비) | 불보정 | 특정광량 측정방법 | 비선형모델 방법 |
|-----------------|--------|--------------|-------------|
| 0% 광량 (DSNU) | 0.17DN | 0.17DN | 0.20DN |
| 10% 광량 | 1.87% | 0.61% | 0.58% |
| 30% 광량 | 2.17% | 0.24% | 0.18% |
| 50% 광량 | 2.21% | 0.21% | 0.18% |
| 70% 광량 | 2.25% | 0.16% | 0.13% |
| 90% 광량 | 2.18% | 0.19% | 0.13% |
| 100% 광량 | 2.18% | 0.16% | 0.12% |

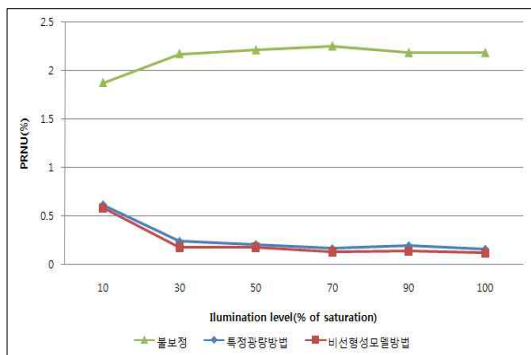


그림 5. 광량대비 픽셀 불균일도 시험결과

5. 결 론

실제 영상센서의 각 픽셀은 균일한 광량의 빛에 대하여 균일하게 반응하지 않는다. 이러한 픽셀의 불균일 응답 특성은 고정된 형태의 잡음으로 영상품질에 직접적으로 영향을 미친다. 본 논문에서는 센서의 불균일 특성을 보정하기 위한 보정 알고리즘을 보여준다. 보정 알고리즘으로, 기존에는 특정 광량 조건에서 보정계수를 획득하는 방법을 사용하곤 했지만, 센서의 비선형성으로

인하여 신호가 작거나 아주 큰 경우에는 보정 효과가 크지 않다. 따라서 논문에서는 이러한 영상센서의 비선형 특성을 고려하여 픽셀 비선형 모델을 기반으로 한 불균일 보정계수 계산하는 방법을 제시한다. 또한, 자체 구현한 카메라와 별도의 시험셋업을 이용하여 불균일 보정계수를 획득한 후, 불균일도 시험을 수행하여 알고리즘을 검증하였다. 시험결과는 비선형성 모델을 기반으로 한 보정 알고리즘을 적용했을 때, 모든 광량에서 안정적이고 고르게 불균일 특성을 보정할 수 있음을 보여준다.

참 고 문 헌

1. G.C.Holst, CCD Arrays, Cameras, and Displays, Washington USA, JCD Publishing, 1996, pp.90-121
2. 장수, 응용광학, 서울, 도서출판대우, 1997, pp.82-176
3. A.J.P Theuwissen, Solid-State Imaging with Charge-Coupled Device, Dordrecht Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1996, pp.219-246
4. 김영선, "영상센서 픽셀 불균일 보정 알고리즘 개발 및 시험", 전자공학회 논문지, 제 44권 SC편, 제3호, 2007, pp.29-33
5. J.P.Kong, "Signal Level Analysis of a Camera System for Satellite Application", ISRS2008, 2008
6. E.L.Dereniak, Optical Radiation Detectors, New York USA, John Wiley & Sons, 1984, pp.186-271
7. G.Strang, Linear Algebra, Geodesy, and GPS, MA USA, Wellesley-Cambridge Press, 1997, pp.157-196