

논문 2007-44SC-3-5

영상센서 픽셀 불균일 보정 알고리즘 개발 및 시험

(Proposal and Verification of Image Sensor Non-uniformity Correction Algorithm)

김 영 선*, 공 종 필*, 허 행 팔*, 박 종 역*

(Youngsun Kim, Jong-Pil Kong, Haeng-Pal Heo, and Jong-Euk Park)

요 약

균일한 빛 에너지에 대하여 영상센서의 모든 픽셀은 이상적으로는 균일하게 반응해야하지만 실제적으로는 그렇지 않다. 이러한 영상센서의 불균일 특성은 픽셀자체의 특성과 광학모듈 특성 등에 의하여 발생한다. 영상센서의 불균일 특성은 고정된 형태의 잡음으로 다양한 보정 알고리즘에 의해 보정될 수 있으며 보정능력에 따라 더욱 우수한 영상 품질을 기대할 수 있다. 보통, 영상센서의 불균일 보정은 적절한 알고리즘에 의해 보정계수를 구한 후 이를 적용하여 이루어진다. 본 논문에서는 모든 광량영역에서 좀 더 정확하고 신뢰성 있는 최적의 픽셀 불균일 보정계수 계산 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 불균일 특성을 향상시키기 위해 센서를 1차원으로 모델링하였으며 보정계수를 구하기 위해 여러 광량레벨에서 측정데이터를 얻고 최적의 해를 얻기 위해 최소사승법을 이용한다. 논문에서는 보정계수 획득을 위해 적분구, 프레임그래버를 탑재한 컴퓨터 및 제안한 알고리즘을 구현한 소프트웨어를 사용하였다. 또한 자체 구현한 카메라와 별도의 시험셋업을 이용하여 불균일 시험을 수행하여 제안한 알고리즘을 검증하였다. 제안한 알고리즘을 보정 전 결과 및 기존 방법의 결과와 비교하였으며, 비교 결과, 제안한 알고리즘이 모든 광량에서 가장 좋고 신뢰성 있는 결과를 보여주었다.

Abstract

All pixels of image sensor do not react uniformly even if the light of same radiance enters into the camera. This non-uniformity comes from the sensor pixel non-uniformity and non-uniformity induced by the changing transmission of the telescope over the field. The first contribution to the non-uniformity has high spatial frequency nature and has an influence on the result and quality of the data compression. The second source of non-uniformity has low frequency nature and has no influence of the compression result. As the contribution resulting from the sensor PRNU(Photo Response Non-Uniformity) is corrected inside the camera electronics, the effect of the remaining non-uniformity to the compression result will be negligible. The non-uniformity correction result shall have big difference according to the sensor modeling and the calculation method to get correction coefficient. Usually, the sensor can be modeled with one dimensional coefficients which are a gain and a offset for each pixel. Only two measurements are necessary theoretically to get coefficients. However, these are not the optimized value over the whole illumination level. This paper proposes the algorithm to calculate the optimized non-uniformity correction coefficients over whole illumination radiance. The proposed algorithm uses several measurements and the least square method to get the optimum coefficients. The proposed algorithm is verified using the own camera electronics including sensor, electrical test equipment and optical test equipment such as the integrating sphere.

Keywords : Non-uniformity correction coefficient, Image sensor, PRNU, Gain, Offset, Pixel

I. 카메라 영상센서 불균일 특성

영상센서의 각 픽셀은 이상적으로 균일한 출력을 보

여주어야 하지만 실제 출력은 그렇지 않다. 이러한 불균일 특성(Non-uniformity)은 재료 특성, 픽셀 크기, 도핑 밀도, 코팅 두께 차이와 같은 픽셀자체의 특성과 반사경, 구조체, 렌즈와 같은 광학모듈의 전달도 특성 등에 의하여 발생한다^[1]. 첫 번째의 픽셀 자체의 불균일 특성은 고(高) 공간주파수의 특성을 갖고 이는 영상

* 한국항공우주연구원 다목적실용위성3호 사업단
(Korea Aerospace Research Institute)

접수일자: 2006년8월10일, 수정완료일: 2007년4월20일

데이터 압축 결과 및 영상품질에 영향을 준다. 반면 두 번째 언급한 광학 특성 등에 기인하는 불균일 특성은 저주파의 특성을 가지므로 영상 데이터 압축 결과에 영향을 주지 않는다^{[1][3~4]}.

영상센서의 불균일 보정은 영상수신 전 카메라 전자 내부에서 수행할 수도 있고 영상수신이 완료된 후 영상 처리 과정에서 보정할 수도 있다. 그러나 영상 압축을 수행하는 경우 고주파 성분이 제거될 수 있으므로 최상의 영상 품질을 얻기 위해서는 전자 보드 상에서 영상보정을 수행하는 것이 좋다. 본 논문에서는 고주파 성분을 갖는 영상센서의 불균일 특성을 보정하기 위한 최적의 알고리즘을 제안하고 자체 구현한 카메라와 광학 시험장치를 이용하여 알고리즘을 검증하고 그 결과를 기술하고자 한다.

II. 영상센서 불균일 보정계수

영상센서의 불균일 보정은 적절한 알고리즘에 의해 보정계수를 구한 후 이를 적용하여 이루어지며 불균일 보정을 통해 영상품질을 향상시킬 수 있다.

1. 불균일 보정계수 계산방법

불균일 보정계수는 영상센서의 모델링 방법에 따라 달라진다. 보통 영상센서의 불균일 특성은 1차원으로 모델링하며 이 경우 불균일 보정계수는 각 픽셀마다 계인과 오프셋으로 구성된다. 1차원 모델링의 경우, 균일한 광량에 대하여 모든 픽셀의 이상적인 값은 식(1)과 같다.

$$P_{ideal} = P(i) \cdot Gain(i) + Offset(i) \quad (1)$$

여기서 P_{ideal} 은 모든 픽셀에 대하여 이상적인 출력 값이고 $P(i)$ 는 각 픽셀의 출력 값이다.

똑같은 모델을 사용하더라도 보정계수를 계산하는 알고리즘에 따라 보정 결과가 크게 달라지므로 가장 시스템에 효율적인 알고리즘을 개발하는 것이 중요하다.

가. 두 광량의 측정값 이용방법(알고리즘1)

1차원 모델링의 경우, 식(1)에서 보여주듯이 보정계수로 각 픽셀에서 계인과 오프셋, 두개의 미지수가 존재하므로 기본적으로 두 측정데이터를 얻으면 두 미지수를 구할 수 있다. 두 측정데이터만을 이용하더라도 높은 광량(센서 포화레벨의 약 70~80%)과 낮은 광량(센서 포화레벨의 약 20~30%)의 측정데이터를 이용한다면 모든 광량레벨에서 좀 더 효과적으로 불균일 특성을 보정할 수 있

는 보정계수를 구할 수 있다. 식(2)는 이와 같이 두 측정데이터를 이용하여 보정계수를 구하는 식을 보여준다.

$$\begin{aligned} P_{hideal} &= P_h(i) \cdot Gain(i) + Offset(i) \\ P_{lideal} &= P_l(i) \cdot Gain(i) + Offset(i) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 첨자 h 와 l 은 각각 높은 광량과 낮은 광량레벨을 의미한다. 위식의 해를 구함으로 계인과 오프셋을 구할 수 있다.

나. 제안 알고리즘(알고리즘2)

본 논문에서는 모든 광량영역에서 좀 더 정확하고 신뢰성 있는 픽셀 보정을 수행하기 위해 여러 광량레벨에서 측정데이터를 얻고 최적화 기법을 적용한 보정계수 계산 알고리즘을 제안한다.

식(3)은 여러 지점으로부터 측정값을 얻는 식을 보여준다.

$$\begin{aligned} P_{lev01ideal} &= P_{lev01}(i) \cdot Gain(i) + Offset(i) \\ P_{lev02ideal} &= P_{lev02}(i) \cdot Gain(i) + Offset(i) \\ &\vdots \\ P_{levNideal} &= P_{levN}(i) \cdot Gain(i) + Offset(i) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $levN$ 은 측정데이터를 얻을 때의 광량레벨을 의미한다.

식(3)에서 보여주듯이 미지수에 비하여 측정데이터가 더 많으므로 최소자승법을 적용할 수 있다. 최소자승법은 오차, 즉 식(4)를 최소화하도록 한다^[2].

$$\sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2 \quad (4)$$

여기서 n 은 측정데이터 수, y 는 이상적인 픽셀 출력 값, x 는 각 픽셀의 출력 값이다

오차를 최소화하는 a 와 b 는 편미분 방법에 의하여 구할 수 있으며 각각 식(5), 식(6)과 같다.

$$a = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n y_i x_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (5)$$

$$b = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i x_i \right)}{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (6)$$

이렇게 구한 a 와 b 는 각 픽셀의 보정계수, 즉 게인과 오프셋을 의미한다.

2. 불균일 보정계수 획득시험

보정계수를 구하기 위해서는 균일한 빛 에너지 공급이 필요한데, 이를 위해 적분구(Integrating Sphere)를 이용하였다. 이밖에도 영상데이터 획득을 위한 프레임그래버를 탑재한 시험 장치 등이 필요하다. 그림1은 보정계수 획득을 위한 시험 셋을 보여준다.

본 논문에서는 두 측정값을 이용하는 해를 구하는 방법(알고리즘1)과 여러 측정값을 얻은 후 최소자승법을 적용하는 방법(알고리즘2), 이 두 경우 모두에 대하여 보정계수를 구하였다. 알고리즘1을 위해 두 광량레벨 즉, 센서 포화레벨의 70%레벨과 30%레벨에서 측정데이터를 얻어 이를 이용하였다. 알고리즘2를 위해서는 7단계에서 측정데이터를 얻었는데, 센서 포화레벨의 0%, 10%, 30%, 50%, 70%, 90%, 100% 광량에서 데이터를 획득하였다. 각 단계에서 이상적인 값은 각 라인의 평균값을 사용하

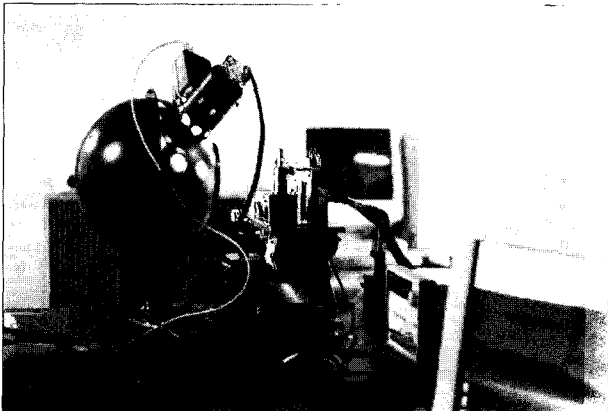


그림 1. 불균일 보정계수를 구하기 위한 시험 셋
Fig. 1. Test setup for non-uniformity coefficient acquisition.

표 1. 획득한 불균일 보정계수 테이블
Table 1. Acquired non-uniformity coefficients.

픽셀번호	홀수픽셀 게인	홀수픽셀 오프셋	짝수픽셀 게인	짝수픽셀 오프셋
1	1	0	1	0
2	1	0	1	0
:	:	:	:	:
251	0.99961	-0.011929	0.999439	0.022261
252	0.999276	0.062318	0.999274	0.110559
253	0.999367	0.050849	0.999351	0.063628
254	0.999182	0.087759	0.998986	0.141507
:	:	:	:	:

였으며 측정오차를 줄이기 위하여 각 광량에서 500라인의 데이터를 샘플링 하였다. 또한 적분구 크기의 제한으로 센서 모든 영역에 균일한 빛 에너지를 제공하지 못해 픽셀 501~4500 픽셀 값만을 이용하여 보정계수를 구하였다. 표1은 알고리즘2를 이용하여 계산한 불균일 보정 테이블 예를 보여준다. 표1에서 홀수픽셀과 짝수픽셀을 구분한 이유는 영상센서의 출력포트가 서로 달라 보정계수를 홀수픽셀과 짝수픽셀을 구분하여 계산하였기 때문이다. 출력포트의 특성은 비디오프로세서를 조정하거나 영상처리과정에서 보정할 수 있다.

III. 카메라의 불균일 특성 시험

제안한 알고리즘은 카메라 불균일 시험을 통해 검증하였다. 불균일 시험을 통해 제안한 알고리즘(알고리즘2)을 적용한 경우와 보정을 수행하지 않은 경우 및 두 측정값을 이용하여 구한 보정계수(알고리즘1)를 적용한 경우를 비교하였다.

1. 불균일성 시험조건 및 계산식

불균일 시험은 불균일 보정계수를 구할 때의 시험환경과 거의 동일한 상태에서 수행하였다. 시험셋업은 그림1과 같이 적분구를 통하여 센서 영역에 균일한 빛 에너지가 도달하도록 하였고 프레임그래버를 통하여 영상데이터를 획득하였다. 표 2는 불균일 시험조건 및 파라미터를 보여준다. 광량에 따라 불균일 특성이 달라질 수 있으므로 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.

불균일 특성의 기준인 불균일도 계산식은 식(7)과 같다^[1].

표 2. 불균일 시험조건 및 파라미터 셋업
Table 2. Non-uniformity test condition and parameters setup.

라인 레이트	2870 lines/sec
VP 조정	게인 : $\times 1$, 오프셋 : 0mV
라인 샘플 수	500
픽셀 영역	501픽셀~4500픽셀
온도	상온
광량 조절	영상센서 포화레벨의 0%, 10%, 30%, 50%, 70%, 90%, 100%

$$PRNU = \frac{(P_{max} - P_{min})}{P_{average}} \quad (7)$$

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

2. 불균일성 시험결과

그림 2는 홀수픽셀에 대하여 불균일 보정을 수행하지 않은 경우와 알고리즘2를 사용하여 불균일 보정을 수행한 경우의 불균일 시험결과를 보여준다. 시험결과는 불균일 보정을 수행하면 불균일도 특성이 월등히 향상됨을 보여준다.

표 3과 그림 3은 알고리즘1과 알고리즘2의 결과를 비교, 정리한 것이다. 시험결과는 알고리즘2가 알고리즘1에 비하여 모든 광량에서 고르게 보정할 수 있음을 보여준다. 특히 알고리즘2는 아주 낮은 광량(센서 포화레벨의 0%, 10%)과 아주 높은 광량(센서 포화레벨의 90%, 100%)에서 특히 좋은 결과를 갖는다. 따라서 알고리즘2

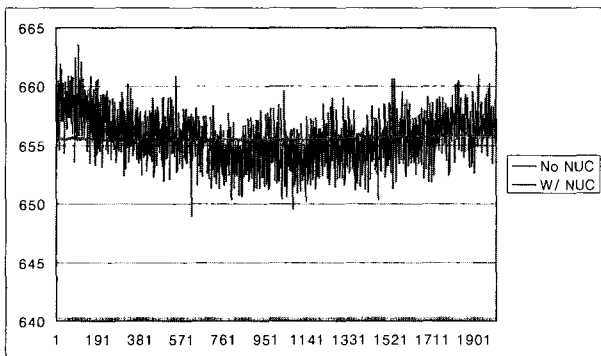


그림 2. 알고리즘2를 적용한 픽셀 불균일 시험결과(광량 레벨 50%)

Fig. 2. Non-uniformity test result using algorithm 2.

표 3. 픽셀 불균일 보정 알고리즘의 시험결과 비교
Table 3. Non-uniformity test results comparison.

광량 (포화대비)	홀수 픽셀			짝수 픽셀		
	보정x	알고1	알고2	보정x	알고1	알고2
0% 광량	1.27%	3.89%	2.02%	0.70%	1.67%	0.67%
10% 광량	1.87%	0.77%	0.37%	1.35%	0.58%	0.26%
30% 광량	2.17%	0.21%	0.17%	1.94%	0.17%	0.18%
50% 광량	2.21%	0.16%	0.17%	2.10%	0.12%	0.16%
70% 광량	2.25%	0.14%	0.13%	2.10%	0.13%	0.13%
90% 광량	2.18%	0.16%	0.13%	2.12%	0.13%	0.11%
100% 광량	2.18%	0.15%	0.11%	2.16%	0.14%	0.11%

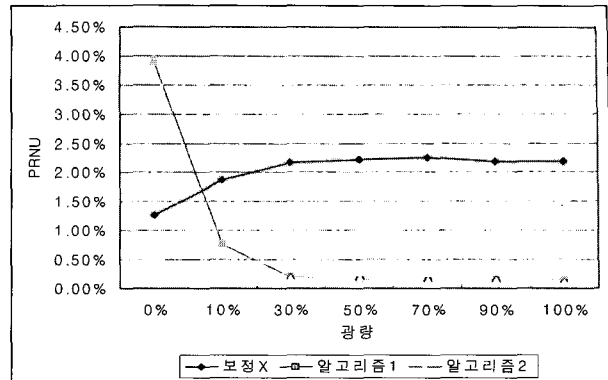


그림 3. 알고리즘1과 알고리즘2의 불균일 시험결과 비교

Fig. 3. Non-uniformity test results comparison between algorithm 1 and algorithm 2.

를 사용했을 때 모든 광량레벨에서 안정적이고 신뢰성 있는 보정을 수행한다고 할 수 있다.

IV. 결 론

영상센서의 불균일 특성은 픽셀자체의 불균일 특성과 광학모듈 특성 등에 의하여 발생한다. 다양한 방법으로 영상센서의 불균일 보정을 수행할 수 있으며 이러한 보정을 통해 영상품질을 크게 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 영상센서의 불균일 특성을 향상시키기 위해 센서를 1차원으로 모델링하였으며 모든 광량영역에서 좀 더 정확하고 신뢰성 있는 픽셀 불균일 보정 계수 계산 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 보정계수를 구하기 위해 여러 광량레벨에서 측정데이터를 얻고 최적의 해를 얻기 위해 최소사승법을 이용한다. 또한 적분구와 시험셋업 장치를 이용한 불균일 시험을 수행해 제안한 알고리즘을 검증하였다. 제안한 알고리즘을 보정 전 결과 및 기존 방법의 결과와 비교하였으며, 비교 결과, 제안한 알고리즘이 모든 광량에서 가장 좋고 신뢰성 있는 결과를 보여주었다. 따라서 제안한 알고리즘을 이용하여 영상 보정을 수행한다면 더 우수한 영상 품질을 기대할 수 있을 것이다.

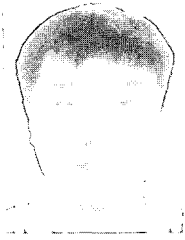
참 고 문 헌

[1] G. C. Holst, "CCD Arrays, Cameras, and Displays", pp. 90-121, JCD Publishing, 1996.
 [2] K. E. Atkinson, "An Introduction to Numerical Analysis", John Wiley & Sons Inc., 1989.
 [3] Y.S.Kim, J.P.Kong, H.P.Heo, J.E.Park, H.Y.Paik,

“CCD Pixel Correction Table Generation for MSC”, *ISRS 2004*, pp. 472-474, Jeju, Korea, 2004. 10.

[4] Y.S.Kim, J.P.Kong, H.P.Heo, J.E.Park, Y.J.Chang, “New In-orbit Pixel Correction Method”, *ISRS 2005*, Jeju, Korea, 2005. 10.

저 자 소 개



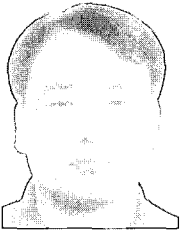
김 영 선
1999년 충남대학교 전자공학과
학사 졸업.
2001년 충남대학교 전자공학과
석사 졸업.
2001년~현재 한국항공우주연구원

<주관심분야 : 위성광학카메라, 제어, 신호처리>



공 종 필
1991년 전남대학교 전자공학과
학사 졸업.
1996년 전남대학교 전자공학과
석사 졸업.
1996년~2000년 국방과학연구소
2001년~현재 한국항공우주연구원

<주관심분야 : 위성광학카메라, 반도체, 회로>



허 행 팔
1995년 숭실대학교 전자공학과
학사 졸업.
1997년 숭실대학교 전자공학과
석사 졸업.
1997년~현재 한국항공우주연구원

<주관심분야 : 위성광학카메라, 제어, 신호처리>



박 종 역
1998년 아주대학교 전자공학과
학사 졸업.
1998년~1999년 삼성전자연구원
2002년 아주대학교 전자공학과
석사 졸업.
2002년~현재 한국항공우주연구원

<주관심분야 : 위성광학카메라, 제어, 신호처리>