

위성카메라 전자부의 화소간 응답불균일성 보정계수의 비교검토

공종필* · 이성재**†

*한국항공우주연구원, **충남대학교 전자공학과

Comparison of Correction Coefficients for the Non-uniformity of Pixel Response in Satellite Camera Electronics

Jong-pil Kong* and Song Jae Lee**†

*Korea Aerospace Research Institute, **Dept. of Electronics Engineering, Chungnam National University

Abstract : Four kinds of gain and offset correction coefficients that are used to correct the non-uniformity between pixels are discussed. And their correction performance has been compared by performing image correction, using the correction coefficients calculated, on the real image data obtained from a newly fabricated camera electronics system. The performance of the correction coefficients depends in general on the number of the light input levels used to obtain the reference image. The result shows that, as expected obviously, when only two light input levels are used to obtain the reference image, even though its correction coefficients are relatively easily calculated, the correction performance is relatively poor. And with the number of light inputs increased to a value of larger than two, the correction performance is improved. It is noted, however, no significant performance difference is found between the different correction coefficients employed.

Key Words : Calibration-based NUC, TDI, CCD, ADU, EOS.

요약 : 위성 카메라전자부의 화소간 불균일성 응답의 보정을 위한 4종류의 이득과 오프셋 보정계수에 대하여 다루었다. 이들에 대한 비교분석을 위해서 CCD를 광검출기로 하는 카메라전자부를 새롭게 제작하고, 이를 이용하여 얻은 영상 데이터에 대하여, 이들 4종의 보정계수를 이용하여 보정을 실행한 후 각각의 보정 성능을 비교하였다. 일반적으로 보정성능은 기준 영상을 얻기 위하여 사용된 빛입력 레벨의 개수에 따라 달라지게 된다. 쉽게 예상될 수 있는 바와 같이, 2 레벨의 빛입력 기준영상만을 이용하여 얻은 보정계수의 경우 보정계수를 계산하기가 쉽다는 이점을 갖고 있지만, 보정성능은 상대적으로 떨어진다는 것을 확인할 수 있었다. 이에 비해 보정계수를 구하기 위하여 사용된 기준영상의 빛입력 레벨의 개수가 2보다 큰 값으로 늘어날 경우, 보정성능은 개선되었다. 하지만 각각의 보정계수들간의 보정성능 상에는 큰 차이가 없는 것으로 평가되었다.

1. 서론

위성 탑재체에 사용되는 광학카메라시스템을 포함한 카메라전자부의 영상불균일성(image non-uniformity)은 균일한 세기의 입력광에 대한 광검출기를 구성하는 각 화소들 사이의 반응의 불균일한 정도를 의미한다. 저궤도에 사용되는 위성시스템에서와 같이 위성이 지상을 스캔하는 경우에, 광검출기로는 통상 선형의 CCD가 사용된다. 한편 CCD는 보통 TDI (Time Delayed Integration) 기능을 갖추게 되는데, 이는 위성카메라에 요구되는 공간해상도가 높아짐에 따라 CCD 라인당 동작속도가 빨라지고, 결과적으로 라인당 노출시간이 짧아져 입력광의 크기가 충분치 못한 경우에 대응하기 위한 기능이라고 할 수 있다. 이 경우 화소간의 불균일성은 TDI 기능 자체가 갖는 필터링 특성에 의해 어느 정도 감소된다고 할 수 있지만, 여전히 카메라시스템의 중요한 성능 지표의 하나가 된다. 이러한 불균일도는 CCD의 각 화소의 입력광에 대한 반응의 차이 때문인데, 그 근본 원인은 광검출기를 구성하는 반도체 재료 및 제조공정 상의 불균일성과(Ji *et al.*, 2000), 광학계의 불균일성 등을 들 수 있다. 광검출기를 구성하는 화소간의 입력광에 대한 반응의 불균일성의 한 예를 도식적으로 나타내면 Fig. 1에 보인 바와 같다. 그림은 n 개 화소의 출력이 k 개의 광입력 조건에서 각 화소가 가지는 광응답 이득의 차이에 의해 서로 다른 출력값을 가지는 예를 보여준다. 광검출기의 이러한 화소간 불균일성은 카메라시스템의 성능에 나쁜 영향을 주는 만큼(Gerald, 1998a; 1998b), 영상의 질을 향상시키기 위해서는 화소간의 불균일성을

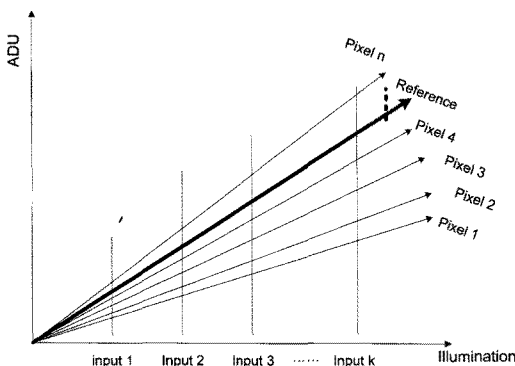


Fig. 1. Non-uniformity caused by differences in the photo-response gain between pixels

보정하기 위한 작업이 필수적으로 요구된다. 일반적으로 선형 CCD나 평면 CCD 등의 광검출기와 같이 입력광에 대한 화소의 반응이 비교적 좋은 선형성(linearity)을 보이는 경우, 불균일성의 보정은 화소의 입력광-출력 특성 커브 상의 이득(gain)과 오프셋(offset)의 정규화(normalization)를 통하여 이루어지게 된다.

영상의 불균일성 보정을 위한 방법은 크게 영상정보에 근거한 방법(scene-based correction method)과 보정계수에 근거한 방법(calibration-based correction method)으로 나눌 수 있다(Ajay *et al.*, 2007). 영상정보에 근거한 방법은 영상의 내용 및 움직임 변수 등의 영상자체가 갖는 정보를 활용하는 반면에, 보정계수에 근거한 방법은 두 가지 이상의 균등한 세기를 갖는 입력광에 대한 각 화소의 출력을 측정하여 각 화소에 대한 이득과 오프셋의 보정계수를 구하고, 이를 이용하여 모든 화소의 특성을 정규화하게 된다. 이때 보통 이득과 오프셋의 보정계수를 계산하기 위해 획득한 영상을 기준영상, 혹은 기준신호라고 부른다. 참고로 본 논문에서는 보정계수에 근거한 보정에 대해서만 다룬다는 사실을 밝힌다.

보정계수에 의한 불균일 보정은 주로 위성 탑재체에 사용되는 전자광학카메라 시스템의 경우와 같이, 계산된 보정계수를 저장매체에 저장한 후 영상촬영과 동시에 불균일 보정을 수행하는 경우에 주로 활용된다. 그리고 우주공간에서 위성체의 사용 시간이 경과됨에 따라 화소간의 불균일 특성이 변하는 경우 이를 보상하기 위하여 지상명령을 통해 보정계수의 업데이트가 가능하도록 시스템을 설계하는 것이 보통이다.

본 논문에서는 선형CCD의 화소간 불균일 보정에 있어서 핵심이 되는 보정계수를 구하는 방법과 이들 보정계수를 이용한 보정성능을 비교 평가하고자 한다. 먼저 일반적으로 사용되는 두 가지 기준영상을 이용하는 보정방법과 3개 이상의 기준영상을 사용하는 보정방법 및 각 화소의 선형성에 근거한 보정방법을 살펴보고 또한 모든 화소의 평균값에 근거한 선형계수를 이용하는 보정방법을 소개하였다. 각각의 보정계수를 구하는 방법에 대한 성능 비교는 Fairchild Imaging사의 CCD를 사용하여 새롭게 개발한 카메라전자부를 이용하였다. 즉 이를 통해 가공되지 않은 데이터를 획득한 다음 이를

이용하여 각각의 보정계수 구하는 방법에 따라 보정계수를 구하고 이를 이용하여 시뮬레이션을 통해 최종 보정성능을 시험, 비교하였다.

2. 시험데이터 획득에 사용된 카메라 전자부 시스템

이 절에서는 불균일 보정계수 계산방법의 평가비교에 사용된 카메라전자부 시스템 소개 및 카메라전자부에서의 광에너지가 전기신호로 변환되는 과정을 살펴보고, 또한 카메라전자부에 있어서 불균일 보정과 밀접한 관계가 있는 성능요소인 출력데이터의 선형성, TDI 동작특성을 카메라전자부의 기본 특성의 하나로 살펴보고자 한다.

1) 카메라전자부 시스템

위성에 사용되는 전자광학카메라시스템은 크게 경통과 반사경으로 구성된 광기계모듈과 카메라전자부로 구성된다. 카메라전자부는 그 핵심이라 할 수 있는 광검출기로서의 CCD와 그 외 주변 전자부로 구성된다. 주변 전자부로는 Fig. 2에서 보듯이 CCD로부터 출력되는 아날로그 신호의 특성을 고려하여 이중샘플링 및 AD변환을 수행하는 신호처리부, CCD가 정상 동작하는데 요구되는 신호레벨로 CCD제어신호를 구동하는 CCD 구동부, 전자부내 전체 동작관리를 수행하는 FPGA 블록, 생성된 디지털 영상데이터를 전송하는 영상데이터 송신부, 생성된 디지털 영상데이터를 전송하는 영상데이터 송신부, 명령 및 상태정보 인터페이스, 전원분배부, 카메라전자부의 명령어/상태정보 처리부 그리고 카

메라전자부로 입력되는 1차 전원을 각 전자부 회로가 요구하는 여러 종류의 2차 전원을 생성, 분배하는 전원분배부로 구성된다. 그리고 카메라전자부의 기능, 성능 시험을 위해서는 카메라전자부에 1차전원을 공급하고, 카메라전자부의 동작제어 및 카메라전자부로부터 출력되는 영상데이터를 수신하고 이를 처리하는 카메라전자부 점검장비가 필요하게 된다.

카메라전자부에 사용된 검출기로는 Fairchild Imaging 사의 CCD5045 모델, 선형 TDI 타입의 CCD를 사용하였다. 이 CCD는 $13 \times 13(\mu m)^2$ 의 화소 크기를 가지며, 5종(96, 64, 32, 16, 4레벨)의 TDI 레벨 동작을 지원한다 (Fairchild Imaging, 2004). 그리고 각 라인당 4,096개의 화소를 가지고 있지만 4개의 출력포트를 통해 포트당 1,024개의 화소를 각각 출력하기 때문에, 1개의 출력포트를 가진 선형 CCD에 비해 4배 빠른 동작속도로 동작할 수 있는 이점을 가지게 된다. 그리고 각 출력포트의 1개의 전자(electron)당 전압 변환율은 약 $3\mu V/e$ 이며, 각 화소당 최대 집적 전자수가 약 200×10^3 개 정도임을 고려할 때, 예상되는 각 화소의 최대출력 전압은 0.6V정도가 됨을 알 수 있다. 그리고 이는 14비트의 AD 변환기 최대 입력전압이 1V임을 고려할 때, 디지털 출력의 최대값은 약 9,830 ADU(Analog-Digital Unit)가 됨을 알 수 있다. 기타 사항으로 불균일성 시험을 위해 개발된 카메라전자부는 비록 우주환경을 고려하여 제작이 되지는 않았지만 현재 저궤도용의 전자광학탑재체에 탑재되는 카메라전자부로서는 최고수준의 동작속도인 27MHz의 화소 출력이 가능하도록 설계되었음을 밝힌다.

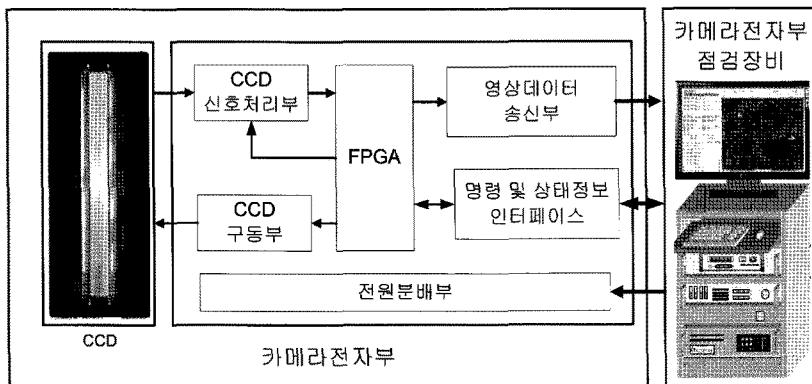


Fig. 2. Camera Electronic Unit Architecture

2) 카메라시스템을 이용한 전자기복사 에너지 측정

Fig. 3은 카메라전자부에서 광에너지가 광검출기인 CCD에 입력된 후 CCD의 양자효율에 따라 전자로 변환되고, 다시 출력노드의 정전용량값에 의해 전압으로 변환된 후, 선택적으로 이득조정을 거친 후 AD변환기를 통해서 디지털화된 출력으로 변환되는 카메라전자부내에서의 신호변환 과정을 보여준다. 이때 출력노드의 정전용량값에 의해 결정되는 전압은 다음 식

$$V_{signal} = G \frac{neq}{C}, \quad (1)$$

과 같이 주어지는 데, 식에서 $q = 1.6 \times 10^{-19} C$, n_e 는 총 전자의 개수, G 는 출력노드 소스팔로워의 이득 그리고 C 는 CCD 출력노드의 정전용량값을 나타낸다 (E.L and D.G, 1984 : Gerald C, 2003). 일반적으로 한 개의 전자가 전압으로 변환되는 이득을 의미하는 q/C 는 $3 \sim 6 \mu V/e$ 정도이고, G 는 1에 근접하는 값을 가지므로 통상 생략하게 된다. 그리고 지구궤도상의 전자광학계를 통해서 CCD의 화소에서 생성되는 전자의 개수는 n_e 는 다음 식

$$n_e \cong \eta(\lambda) L_e \left(\frac{\pi}{4} \right) A_D \tau_{OPTICS} \tau_{ATM} T_{im} \frac{\lambda}{hc} \Delta\lambda, \quad (2)$$

과 같이 표현할 수 있는데, 식에서 $\eta(\lambda)$ 은 양자효율, L_e 은 입력되는 전자기복사에너지, F 는 광학계의 유효초점거리를 광학계의 구경으로 나눈 비율인 에프넘버(f-number), A_D 는 CCD 화소 면적, τ_{OPTICS} 와 τ_{ATM} 는 각각 광학계와 대기층의 투과율, T_{im} 는 CCD의 한 라인당 전하 획득시간(노출시간), h 는 플랑크상수, c 와 λ 는 각각 빛의 속도와 파장을 의미한다. 식 (2)를 이용할 경우, 입사된 빛 에너지에 따른 전자수 및 출력전압을 예측함으로써 최종 디지털화 된 출력을 예측할 수 있는데, 한

가지 중요한 사실은 전자수 및 출력전압은 노출시간 (T_{im}) 즉 한라인당 빛을 받아들이는 시간에 비례하게 된다는 점이다. 그러나 노출시간은 카메라시스템의 분해능을 향상시키기 위한 목적으로 점점 짧아지는 추세를 감안한다면, 카메라시스템이 요구하는 충분한 출력을 낼 수 없는 경우가 흔하게 되는데, 이런 경우 TDI 동작을 지원하는 선형의 CCD를 사용함으로써 CCD가 지원하는 TDI 레벨 배수만큼의 강화된 출력을 얻을 수 있게 된다.

3) 선형성

카메라전자부의 선형성은 입력에너지의 변화에 대해 반응하는 카메라전자부를 구성하는 모든 요소의 출력관계를 종합적으로 나타내는 성능지수이다. 이를 측정하기 위해서는 카메라 시스템의 입력광을 증가 혹은 감소시키면서 그때의 출력을 기록하여 그 선형성을 측정하게 된다. 광에너지를 증감하는 방법에는 적분구에 사용되는 램프의 수를 조절하거나 혹은 적분구와 카메라 전자부의 입력단 사이의 거리를 조절하는 방법 그리고 카메라전자부의 라인당 노출시간을 조절하는 방법 등이 있다. 본 논문의 시험에서는 그 중 시험 시스템 구성의 변경 없이 가장 간단하게 실현할 수 있는, 라인당 노출시간 조절에 의한 방법을 사용하였다. Fig. 4는 TDI 레벨을 16으로 고정된 후, 한 라인당 노출시간을 조절하면서 기록한 출력신호 레벨을 ADU(Analog Digital Unit)로 도시한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 x축은 선형 CCD의 개별 화소의 번호, 즉 4096개의 화소를 나타내고 y축은 각 화소의 출력신호 레벨을 보여준다. 각 화소의 출력신호 레벨은 랜덤 잡음을 제거하기 위해 1,000라인의 화소값을 평균한 값을 사용하였다. 그림에서 신호레벨은 광입력이 없는 암신호를 시작으로 라인

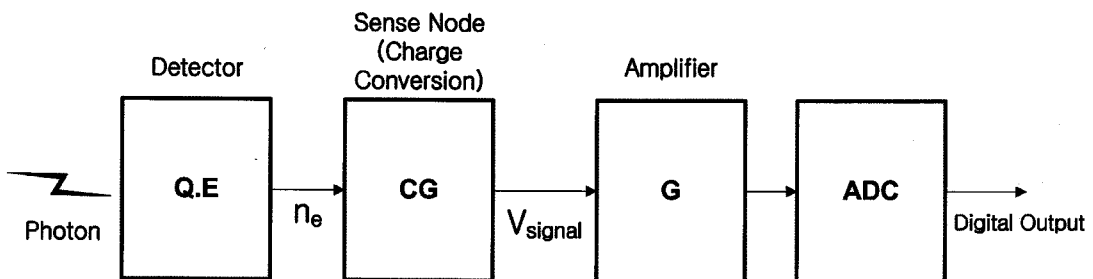


Fig. 3. Signal Conversion Diagram from Photon to Digital Output

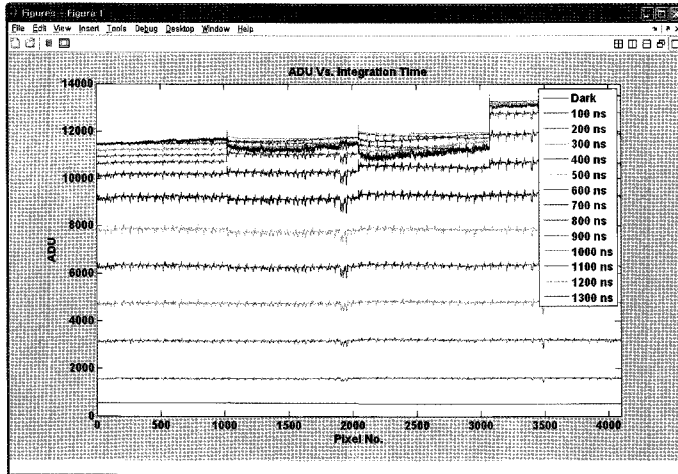


Fig. 4. Signal Level (ADU) vs. Integration Time

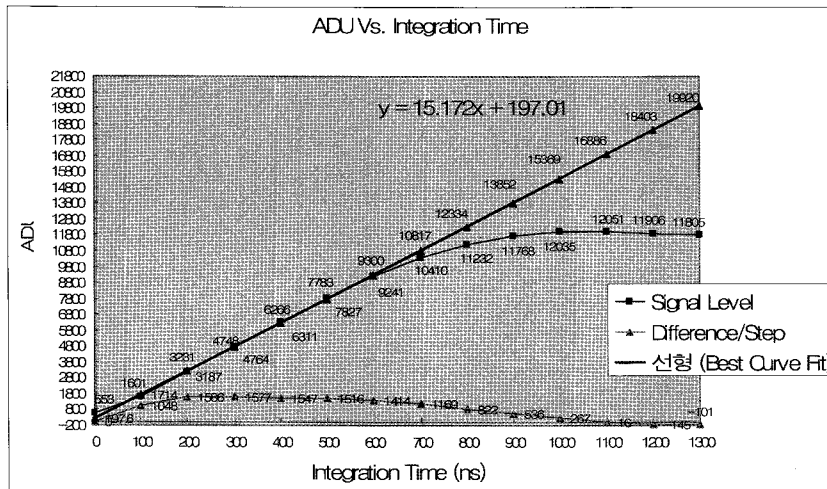


Fig. 5. Average Signal Level vs. Integration Time

당 노출시간(그림에서 Integration Time)을 100 ns부터 1,300 ns까지 100 ns씩 증가 시키면서 측정한 값을 나타낸다. 결국 그림에서 신호레벨 사이의 간격은 100 ns만큼의 노출시간이 증가함에 따른 출력신호 레벨의 변화량에 해당된다고 할 수 있다. 그림에서 노출시간이 상대적으로 낮은 영역에서는 노출시간이 100 ns씩 노출시간이 증가함에 따라 출력값이 약 1,500 ADU 정도씩 증가하게 된다. 하지만 화소출력값이 약 9,000 ADU 근방에서는 더 이상 노출시간의 증가로 인하여 입력되는 광에너지량이 증가하더라도 출력값에 변화가 거의 증가하지 않고 포화되는 현상이 나타나게 되는데, 이 포화레벨은 예측된 출력레벨에서 발생됨을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 내용을, 다른 방식으로, 즉 x축은 노출시간을 나타내고, y축은 디지털 출력값을 나타내도록 표현한 것이다. 그림에서 Signal Level로 표시된 커브는 노출시간을 100 ns단위로 변경하면서 기록한 4,096개 화소들의 출력 평균 값을 표시한 것이고, Best Curve Fit으로 표시된 커브는 이들 평균출력 값 중에서 선형성이 잘 유지되는 노출시간의 200 ns - 600 ns일 때의 출력 값들에 대해 최소자승법에 의한 최적의 일차 방정식 커브를 나타내고 있는데, 그 일차방정식은 아래 식

$$y = 15.17x + 197, \tag{3}$$

같이 주어진다. 식의 x는 100 ns단위로 증가하는 노출시간을 의미하고, y는 디지털화된 화소 출력값을 나타낸

다. 그리고 $Difference/Step$ 으로 표시된 값은 각 노출시간이 100 ns 증가할 때의 출력값의 증가량을 나타낸 것으로, 이상적인 CCD의 경우 y축의 값이 일정하게 유지되는 게 바람직하나 통상 CCD의 경우 입력광이 너무 약하거나 너무 큰 영역에서는 각각 CCD의 비선형 특성과 포화특성으로 인하여 일정한 값을 유지할 수 없게 된다. 이 그래프로부터 증가하는 입력광에 대해 화소출력이 일정하게 증가하는 즉 선형성의 특성을 보이는 노출시간 영역은 200 ns ~ 600 ns 구간임을 확인할 수 있는데, 이 노출시간 영역에 대응하는 화소출력값의 범위는 3,200 ~ 9,200 ADU 정도임을 알 수 있다. 이 구간에서 다음 식

$$R^2 = \frac{\sum(y_i - \bar{y})^2 - \sum(y_i - y_{fit})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum(y_i - y_{fit})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

에 의해 정의된 상관계수는 거의 1(0.999 이상)이 되어 선형성이 잘 보장된다는 것을 알 수 있는데, 식에서 y_i , \bar{y} , y_{fit} 는 각각 측정된 각 화소 출력레벨, 모든 화소 출력의 평균값, 그리고 최소자승법에 의해 계산된 최적의 1차 함수에 의해 예측된 출력값을 나타낸다.

4) TDI Operation

Fig. 6은 동일한 광입력 조건에서 TDI 레벨을 4, 16, 32, 64로 변화시켜 가면서 측정된 모든 화소 출력의 평균값을 그래프로 나타낸 것이다. 먼저 *Dark Signal*로 표현된 커브는 광입력이 없는 상태에서 측정된 화소 출력값 암신호 크기를 나타낸 것이며, *With Dark Signal*과 *with dark signal removed*로 표시된 커브는

각각 암신호가 포함된 측정값과 암신호가 제거된 측정 신호를 의미한다. 이들 측정신호로부터 계산된 TDI 16과 TDI 32간의 비율, TDI 32과 TDI 64간의 비율은 각각 1.90, 1.98로 예상값 2에 비해 5% 오차범위내에 있으나 TDI 4와 TDI 16간의 비율은 예상 기대값 4에 비해 약 20% 이상의 오차가 있음을 확인할 수 있다.

3. 불균일 보정계수 계산 방법 비교

먼저 4가지의 불균일 보정계수 계산방법을 소개한 다음, 각각의 보정계수를 이용한 불균일 보정 성능을 시험, 비교하였다. 미가공 데이터 획득은 16 TDI 레벨을 사용하였고, 선형성이 보장되는 구간인 노출시간 200 ns ~ 600 ns 사이의 동작조건에서 저장한 데이터를 이용하여 보정계수를 얻었다. 불균일 보정은 위성이 지상을 스캔하는 동시에 얻어지는 고속의 데이터에 대해 실시간으로 수행되어야 하기 때문에, 고속으로 보정이 가능하도록 1차의 보정계수 즉 이득과 오프셋 만을 구하게 되는 것이 보통이다. 일반적으로 광입력에 대한 선형성이 보장되는 영역에서 영상이 얻어지기 때문에 일차 보정계수만을 이용하더라도 불균일 보정이 상대적으로 잘 성취된다고 할 수 있다.

1) 이점(two-point) 기준영상을 이용한 보정계수 계산

이 방법은 4가지의 계산방법 중 가장 간단한 방법인

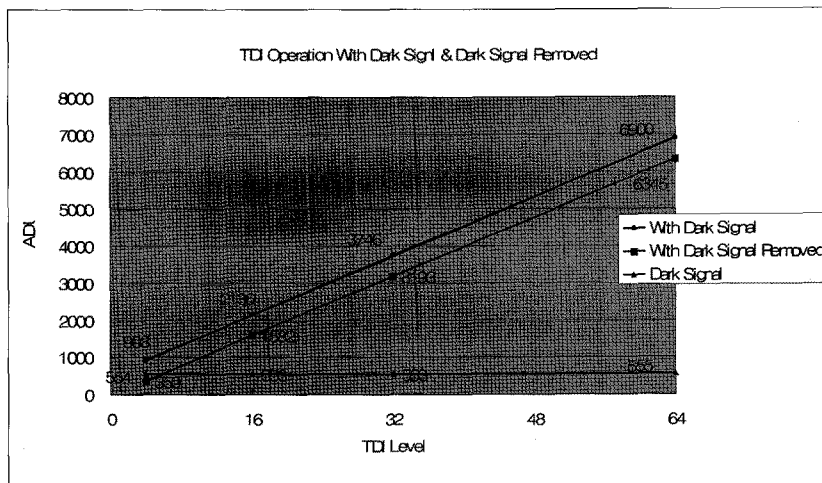


Fig. 6. ADU vs. TDI Level

데, 두 가지의 서로 다른 레벨의 광입력에 대해 모든 화소 출력 데이터를 이용하여 보정계수를 구하게 된다. 좀 더 구체적으로 살펴보면, 두 가지의 광입력에 대해 각 화소에 대해 목표출력값 T_k 와, 그때 n 개 화소의 출력값 y_{ik} 사이에 아래의

$$T_k = G_i y_{ik} + O_i \quad (k = 1, 2; i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

관계식으로부터 각 화소의 이득과 오프셋인 G_i, O_i 는

$$\begin{bmatrix} G_i \\ O_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_1 - T_2}{y_{i1} - y_{i2}} \\ \frac{y_{i1}T_2 - y_{i2}T_1}{y_{i1} - y_{i2}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

와 같이 얻어진다. 식에서 목표출력값의 밑변수는 두 종의 광입력을 나타내는 지수이며, 이때 목표출력값은 각 광입력조건에서 모든 화소의 평균값 혹은 최대값을 사용하게 되는데 본 논문에서는 평균값을 사용하였다. 이 점보정계수 방법은 두 기준영상을 얻기 위해 사용된 입력광의 근처에서는 보정성능이 우수하지만 그 외의 입력광에 대해서는 사용된 카메라시스템의 선형성이 보장되지 않은 만큼 잘 맞지 않는다는 단점을 갖는다.

2) 다점 (multi-point) 기준영상을 이용한 보정계수 계산

이점 기준영상을 이용한 보정계수를 이용하여 불균일 보정을 하는 경우 기준영상 신호 이외의 신호레벨에서 불균일 보정성능이 떨어지는 단점을 보완하기 위한 방법으로, 기준영상의 신호레벨을 세 곳 이상에서 획득하여 보정계수를 구하는 방법이다. 따라서 목표출력값의 밑변수가 최소한 3 이상이 되어야 하며, 총 N 개 신호레벨의 기준영상을 이용하는 경우 각 화소의 불균일보정계수인 이득 G_i 와 오프셋 O_i 는 최소자승법을 이용하여 다음

$$\begin{bmatrix} G_i \\ O_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N \sum_{k=1}^N y_{ik} T_i - (\sum_{k=1}^N y_{ik}) (\sum_{k=1}^N T_i)}{N \sum_{k=1}^N y_{ik} T_i - (\sum_{k=1}^N y_{ik}) (\sum_{k=1}^N T_i)} \\ \frac{(\sum_{k=1}^N y_{ik}^2) - (\sum_{k=1}^N T_i) - (\sum_{k=1}^N y_{ik}) (\sum_{k=1}^N y_{ik} T_i)}{N \sum_{k=1}^N y_{ik}^2 - (\sum_{k=1}^N y_{ik})^2} \end{bmatrix} \quad (k=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

같이 얻어지게 된다(김영선 외, 2007). 사용된 기준신호

레벨의 개수가 증가할 수록 좀더 정확하게 동작하는 이득과 오프셋을 구할 수 있는 반면 시험에 요구되는 시간이 더 걸리는 단점이 있다.

3) 각 화소의 선형계수를 이용한 보정계수 계산

이 방법은 다점 기준영상을 이용한 방법에서와 같이 여러 개의 기준영상을 필요로 한다는 점에서는 유사하나 각 화소의 선형성 시험 시, 이미 구한 각 화소의 최적 선형계수를 이용하여 불균일 보정계수를 구한다는 점이 다르다. Fig. 1에서 언급한 바와 같이 모든 화소의 광입력에 대한 응답 함수는 통상 일차함수로 근사화 되나 각각이 일치되지 않으면 임의의 신호레벨에 있어서 당연히 화소의 불균일을 초래한다는 사실에 기초한 것으로, 각각의 선형계수를 정규화하여 불균일 보정을 수행하는 방법이라 할 수 있다. 즉 먼저 각 화소의 입,출력 데이터를 가지고 구한 최적의 입력과 출력 사이의 일차함수

$$y_i = a_i x + b_i \quad (8)$$

로부터 각 화소의 최종 불균일 보정계수를 구하는데, 식에서 x, y_i 는 각각 모든 화소에 동일한 크기로 입력되는 입력변수, i 번째 화소의 최적일차반응식의 출력 변수를 의미하고, a_i, b_i 는 각 화소의 일차반응식의 이득과 오프셋을 의미한다. 그리고 각 화소의 최종 불균일 보정계수인 이득 G_i 와 오프셋 O_i 는 이들 구해진 값들을 이용하여 다음 식

$$O_i = b_i \quad (9)$$

$$G_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N a_i \text{ or } \max(a_i) \quad (10)$$

$$G_i = \frac{1}{a_i} (G_m) \quad (11)$$

을 이용하여 구하게 된다. 식 (10)에서 G_m 은 모든 화소의 일차반응식의 이득 값들에 대한 정규화 값으로, 모든 화소의 이득 평균값이나 혹은 최대값을 선택적으로 사용하게 된다. 그리고 각 화소의 불균일 보정계수 오프셋은 최적일차반응식의 오프셋을 그대로 사용한다.

4) 전체화소 평균 선형계수를 이용한 보정계수 계산

이 방법은 3.3)절에 소개된 방법과 거의 유사한 방법으로 다만 식 (11)에 사용된 G_m 을 구하는데 있어서 식 (3)을 통해서 얻은 15.17로 계산된 이득, 즉 여러 출력레

Table 1. Non-Uniformity Results for different NUC coefficients

보정계수계산법	노출시간(ns)	노출시간(ns)	불균일보정전 NU(%)		불균일보정후 NU(%)	
	기준신호용	불균일도 평가용	Std	(Max-Min)	Std	(Max-Min)
이점보정계수법 (Two-point)	200 / 600	350	1.23	14.22	0.23	1.32
		450	1.23	14.04	0.42	1.92
다점보정계수법 (Mulit-point)	200-600 5point	350	1.23	14.22	0.055	0.45
		450	1.23	14.04	0.23	1
각 화소선형계수이용	200-600 5point	350	1.23	14.22	0.056	0.463
		450	1.23	14.04	0.24	1.03
전체화소선형계수이용	200-600 5point	350	1.23	14.22	0.056	0.46
		450	1.23	14.04	0.24	1.03

벨에 대해 전체 화소의 평균값들을 이용하여 구한 일차 선형계수 이득으로 대체하는 것이다. 이 이득을 G_c 라고 하면 각 화소의 불균일 보정계수 중 이득 G_i 는

$$G_i = \frac{1}{a_i}(G_c) \quad (12)$$

로부터 계산하고, 오프셋은 식(9)에서 구한 값을 사용하게 된다.

4. 시험결과 및 불균일 보정성능 비교

소개된 4가지의 불균일 보정계수 구하는 방법을 비교하기 위하여, 개발된 카메라전자부에 적분구를 이용하여 기준영상 데이터를 얻고 이를 이용하여 4가지 보정계수 계산방법에 의한 불균일 보정계수를 구하였다. 그리고 기준영상으로 사용하지 않은 신호레벨에서 획득한 데이터에 이들 보정계수를 적용하여 불균일 보정을 수행한 후 불균일도를 시험, 비교함으로써 각 방법에 대한 성능을 평가, 비교하였다. 불균일도 (NU:Non-Uniformity) 판단은 다음의 두식

$$NU(\%) = \sigma / Average \quad (13)$$

$$NU(\%) = \max - \min / Average \quad (14)$$

에 의해 계산할 수 있는데, 두 식에서 σ 는 모든 화소의 표준편차를 의미하고, \max , \min , $Average$ 는 각각 모든 화소의 최대값, 최소값 그리고 평균값을 의미한다. 즉 불균일 보정을 한 후 불균일도 계산은 얻어진 모든 화소의 표준편차를 평균값으로 나누거나 모든 화소의 최대값과 최소값의 차를 평균값으로 나누는 방법으로 계산할 수 있는데, 본 논문에서는 두 방법을 모두 사용하였

다. 불균일 계수 계산시 기준영상의 신호 레벨은 개발된 카메라 전자부의 선형성이 확보되는, 노출시간 200 ns - 600 ns사이의 동작조건에서 기록한 데이터를 이용하였고 실제 불균일도 시험 역시 200 ns - 600 ns 범위에는 있지만 기준신호로 사용되지 않은 350 ns과 450 ns의 노출시간을 동작조건으로 하여 저장된 데이터에 대해 수행하였다. 이점 기준영상을 이용한 보정계수의 경우 기준영상을 구할 때 사용한 노출시간은 200 ns와 600 ns였으며, 다점 기준영상을 이용한 보정계수의 경우는 이 두 레벨을 포함하여 200 ns - 600 ns사이의 총 5가지 레벨의 기준영상을 사용하였다. 4가지 방법을 이용한 불균일 보정 시험결과는 Table 1로 정리되며 식 (13)과 식 (14) 중 어떤 평가방법을 사용하더라도, 여러 신호레벨의 기준영상을 이용하는 보정계수 계산방법이 이점 기준영상을 사용하는 방법에 비해 불균일도 성능 비교 시 더 우수하고, 그들간에는 불균일도 성능차이가 거의 없음을 볼 수 있다. 참고로 Fig. 7은 이점 기준영상을 이용한 보정계수 계산방법에 의해 보정계수를 구하고 이를 적용하여 수행한 불균일보정 결과를 보여주는데 화소의 출력값이 5,500 ADU 근방은 노출시간이 350 ns, 7,000 ADU 근방의 값은 450 ns일 때의 화소출력값을 의미한다. 그림에서 각 출력레벨에서의 보정 전 데이터는 4,096화소간 출력값의 최대값과 최소값의 차이가 약 700ADU 이상으로 불균일한데 반해서 보정 후 데이터는 그림 상에서 그 차를 쉽게 확인할 수 없을 정도로 보정이 되었음을 확인할 수 있다. Fig. 8은 Fig. 7과 동일하게 설명되며 단지 다점 기준영상을 이용하여 계산한 보정계수를 사용하여 보정한 결과 그래프를 보여준다.

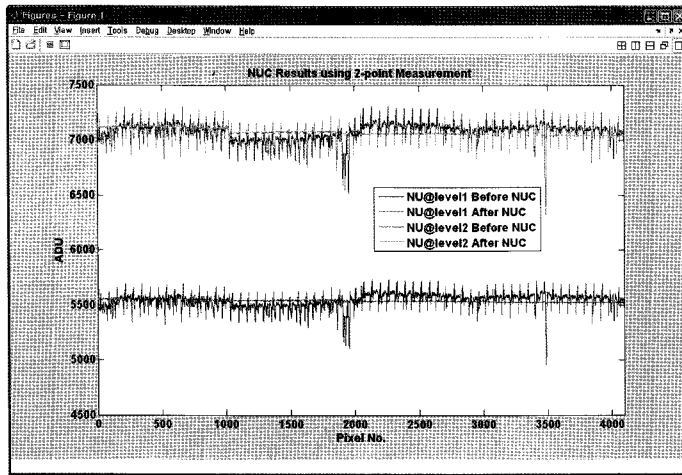


Fig. 7. NU Before/After two-point correction

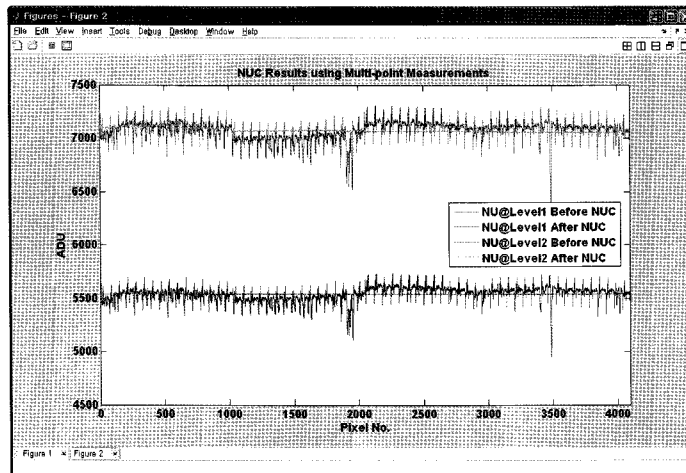


Fig. 8. NU Before/After Multi-Point correction

5. 결론

위성용 카메라전자부의 보정계수를 이용한 불균일 보정방법에 있어서 핵심이 되는 불균일 보정계수 구하는 방법 4가지를 소개하였다. 그리고 이들의 성능을 비교하기 위하여 새롭게 개발된 카메라전자부를 이용하여 데이터를 획득하고 4종의 방법을 통해 구한 보정계수를 적용하여 불균일 보정 후 결과를 비교, 검토하였다. 여러 신호레벨의 기준영상을 이용하는 보정계수 계산방법이나, 카메라전자부의 일차선형함수 계수를 이용하는 방법의 경우 근본적으로 각 화소의 불균일 보정계수인 이득과 오프셋을 최소자승법을 이용하여 구하게 되며,

그들간의 불균일 보정성능 또한 유사한 것으로 평가되었다. 그리고 이점 기준영상을 이용하여 보정계수 구하는 방법의 경우 시험은 상대적으로 간단하나, 예상대로 여러 신호레벨의 기준영상을 이용하는 방법에 비해, 기준신호 이외의 입력신호레벨에 대해서 보정성능이 떨어지는 것으로 평가되었다. 따라서 이들 보정계수 계산이 비교적 시험에 제한이 없는 지상시험을 통해 한번 이루어진 후 위성탑재 카메라전자부에 저장되어 지속적으로 사용되기 때문에, 당연히 여러 기준영상을 이용하여 최적의 보정계수를 구하는 것이 바람직할 것이다.

참고문헌

- 김영선, 공종필, 허행팔, 박종억, 2007. 영상센서 픽셀 불균일 보정 알고리즘 개발 및 시험, 대한전자공학회지, 44(3): 29-33.
- Ajay, K., S. Sarkar, and R. P. Agarwal, 2007. Fixed pattern noise correction and implementation for infrared focal plane array based staring system using scene statistics, *IJISE*, GA, USA, 1(1).
- Derenias, E. L. and D. G. Grove, 1984. *Optical Radiation Detectors*, John Wiley & Sons, pp. 3-23, pp. 232-256.
- Ji, J. K., J. R. Yoon, and K. Cho, 2000. Nonuniformity correction scheme for an infrared camera, *Opt. Eng.* 39(4):936-940.
- Fairchild Imaging, 2004. CCD5045 Time Delay Integration Line Scan Sensor data sheet.
- Gerald, C. H., 1998a. *Testing and Evaluation of Infrared Imaging System*, second edition, SPIE Optical Engineering Press, pp. 53-238.
- Gerald C. H., 1998b. *CCD Arrays, Cameras, and Displays*, SPIE Optical Engineering Press, p. 123.