



Received: 2026/06/19
Revised: 2026/07/02
Accepted: 2026/08/24
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

Jeong-Woo Park

207, Mabuk-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do,
Republic of Korea

Tel: +82-31-326-9117

E-mail: jeongwoo.park@ligdna.com

보정점 선정에 따른 2-Point NUC와 Multi-Point NUC의 성능 비교 분석

Comparative Analysis of Two-Point and Multi-Point Non-Uniformity Correction Performance Based on Calibration Points Selection

박정우^{1*}, 박성현², 유연덕², 박진호³

¹LIG D&A 미사일시스템탐색기연구소 연구원

²LIG D&A 미사일시스템탐색기연구소 선임연구원

³LIG D&A 미사일시스템탐색기연구소 수석연구원

Jeong-Woo Park^{1*}, Sung-hyun Park², Yeondeok Yoo², Jin-Ho Park³

¹Research engineer, Missile System IIR Seeker R&D Lab, LIG D&A

²Research engineer, Missile System IIR Seeker R&D Lab, LIG D&A

³Chief engineer, Missile System IIR Seeker R&D Lab, LIG D&A

Abstract

본 논문에서는 IRFPA 픽셀의 응답 특성을 분석하고, 다양한 보정점 조합에 대한 선형 근사 오차를 비교하여 최적의 보정점을 선정하는 방법을 제안한다. 이를 위해 흑체 온도 변화에 따른 픽셀 응답 데이터를 기반으로 응답 곡선을 생성하고, 보정점 위치에 따른 보정 오차를 정량적으로 분석하였다. 또한 동일한 데이터에 대해 2-point NUC와 multi-point NUC를 적용하여 보정 성능을 비교하였다.

In this study, we analyzed the response characteristics of individual pixels in an infrared focal plane array and developed a method for selecting the optimal calibration-points by comparing the linear-approximation errors associated with various calibration-point combinations. To this end, we first generated pixel response curves based on the measured responses to varying black-body temperatures, and then quantitatively evaluate the calibration error as a function of the calibration-point locations. We applied both two-point non-uniformity correction (NUC) and multi-point NUC to the same dataset and compared their respective correction performances.

Keywords

적외선 영상(Infrared Imaging), 불균일도 보정(Non-Uniformity Correction, NUC), 보정 기반 NUC(Calibration-Based NUC, CBNUC), 2점 보정(Two-Point Correction, TPC), 다점 보정(Multi-Point Correction, MPC), 비선형 응답 특성(Nonlinear Response Characteristics)

Acknowledgement

이 논문은 2026년도 한국해군과학기술학회 하계학술대회 발표 논문임.

1. 서론

적외선 카메라의 반응 특성은 제조공정이나 검출기 소자 특성, multiplex, input circuit 등의 요인에 따라 불균일하게 나타난다. 이러한 각 픽셀 간의 불균일도는 영상 품질의 저하를 야기한다. 본 논문에서는 픽셀 응답 데이터로부터 적절한 보정점을 선택하여 출력 불균일도에 의한 노이즈를 완화하기 위해 calibration NUC 방식을 수행한다. 이때 픽셀의 비선형 특성을 반영한 모델링을 통해 최적화된 보정점을 선택하고 2point NUC(TPC)와 multi point NUC(MPC)을 수행한 후 적외선 영상 품질을 비교한다.

2. 영상노이즈 성분

영상 품질을 저하시키는 노이즈는 크게 temporal noise와 fixed pattern noise(FPN)로 분류할 수 있다. temporal noise는 shotnoise, 잡음과 같은 요인으로 인해 시간에 따라 변화한다. Temporal noise는 mean filter를 사용하여 열잡음을 보정하거나 프레임 간의 오차를 다중 프레임 평균을 활용하는 방식을 통해 보

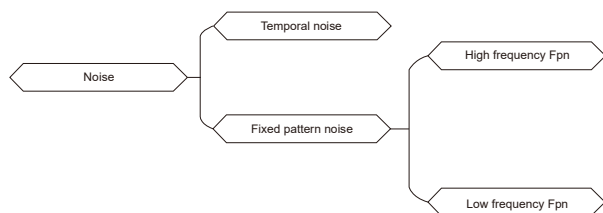


Fig. 1. Noise classification

정이 가능하다.

FPN은 타겟과 배경의 대조도를 낮추기 때문에 적외선 영상에서 심각한 문제를 발생시킨다. 이러한 FPN을 노이즈 특성에 따라 분류하고 각 유형에 적합한 보정방식에 대해 서술한다. FPN은 high-frequency FPN과 low-frequency FPN으로 구분할 수 있다. High frequency FPN은 주로 scene-based NUC를 통해 효과적으로 감소시킬 수 있다. 반면 low frequency는 stray light, optical 효과, 열잡음에 의해 나타난다. 이러한 low frequency FPN은 일반적으로 calibraion NUC 방법을 사용하여 보정한다.

3. NUC

NUC는 크게 CBNUC(calibration based NUC)와 SBNUC(scene based NUC)로 구분할 수 있다. 각각의 NUC 방법은 장단점이 존재한다. 우선 CBNUC는 하드웨어 이식에 용이하다는 장점이 있지만 NUC 파라미터를 적응적으로 변경할 수 없기 때문에 사전에 정의된 dynamic range 내에서만 적용이 가능하다. 반면 SBNUC는 calibration 과정이 필요없다는 장점이 있으나 하드웨어에 implementation하는 것이 복잡하고 고속 이동 표적에 대해서는 ghosting 현상이 발생할 수 있다는 단점이 존재한다.

CBNUC는 linear NUC와 non-linear NUC로 나누어진다. non-linear NUC는 고차 다항식 등을 사용하여 실제 픽셀 응답에 더 적합한 응답을 모델링하는 방식이다. 하지만 liner NUC 대비 한 픽셀 당 필요한 보정 계수들이 증가하여 하드웨어 메모리 사용량이 급증한다는 단점이 있다. Linear NUC는 픽셀의 응답이 선형적이라는 가정을 가지고 수행하며 one-point NUC, 2-point NUC, piecewise 2-point(multi point) NUC 방식이 있다. One-point NUC는 offset 값만 사용하고 2-point는 offset과 gain 보정 계수를 이용한다. 하지만 실제 픽셀의 응답은 비선형 특성을 가진다. 이를 보

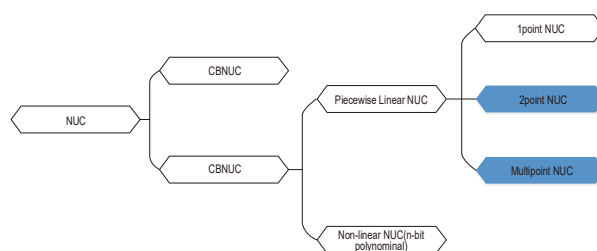


Fig. 2. NUC classification

완하기 위해서 비선형적인 특성을 가지는 구간을 여러 구간으로 설정하고 구간별로 2-point NUC를 수행한다. 이때 각 구간별로 보정 계수를 별도로 계산하는 방식을 piecewise 2-point NUC라고 한다. 본 논문에서는 2-point NUC와 multi-point NUC를 적외선 카메라에 수행하고 성능을 비교한다.

3.1 2-Point NUC

2-point NUC는 픽셀의 출력 값을 모델링할 때 gain calibrated factor와 offset calibrated factor, radiant flux를 사용한다. 2-point NUC 과정은 검출기의 출력이 식 (1)과 같이 선형적이라는 가정으로 수행된다. 우선 array pixel을 보정하기 위해 2개의 radiant flux 포인트를 선정한다.

$$S_{ij}(\Phi) = k_{ij} \times \Phi + b_{ij} \quad (1)$$

$$S(\Phi) = \sum_{i=1}^N \frac{S_i(\Phi_1)}{N} \quad (2)$$

$$\begin{cases} S(\Phi_1) = k_i \times S_i(\Phi_1) + b_i \\ S(\Phi_2) = k_i \times S_i(\Phi_2) + b_i \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} k_i = \frac{S(\Phi_2) - S(\Phi_1)}{S_i(\Phi_2) - S_i(\Phi_1)} \\ b_i = S_i(\Phi) - k_i \times S_i(\Phi_1) \end{cases} \quad (3)$$

$$S_{ij}(\Phi) = k_{ij} \times \Phi + b_{ij} \quad (4)$$

식 (2)와 같이 이상적인 적외선 카메라 출력값은 한 프레임 픽셀 출력의 평균으로 설정하여 해당 값을 계산한다. 식 (3)에서 두 point에 대한 출력 모델링식으로부터 각 픽셀에 대한 gain, offset 계수를 계산한다. 위의 과정을 통해 식 (4)와 같이 임의의 radiant flux를 받는 FPA 내 모든 픽셀에 대해 output 값을 보정할 수 있다.

3.2 Multi-Point NUC

Multi-point NUC는 픽셀의 포화 영역 근처에서 픽셀의 응답이 비선형적인 특성이 도드라지는 점을 보완하기 위해 비선형구간을 여러 선형구간으로 나누어 구간별로 2-point NUC를 수행하는 것이다. 본 논문에서는 gain, offset 계수와 별도 추가 보정 계수를 활용하여 multi-point NUC를 수행하였다.

4. 결과 및 분석

MIAO Li-feng 등[1]의 연구결과를 통해 SWIRFPA의 포화영역 근방에서 비선형 특성이 알려져 있다. 2-point NUC를 수행하기 위한 최적의 보정점을 찾기 위해 우선 적외선 카메라 출력 값을 획득하고 해당 포인트를 활용하여 Fig. 3와 같이 n차 다항식 피팅 곡선을 모델링하였다. Fig. 4는 모든 온도 쌍에 대해 직선을 만들고 온도 쌍마다 피팅 곡선과의 오차를 저장하

여 평균 오차가 가장 작은 두 포인트를 보정점으로 선택하여 표출한 결과이다. 또한 실제 피팅 곡선과의 오차를 표기하여 보정점으로 설정한 영역에서 멀어질수록 오차가 증가하는 경향이 있는 것을 확인하였다.

Fig. 5는 MatLab 툴을 이용하여 포화구간 비선형 특성을 반영한 가중치를 포함하여 시뮬레이션하여 피팅 곡선과의 오차가 최소가 되는 3개의 선형 영역으로 나누는 그래프이다. Fig. 4, Fig. 5에서 도출한 보정점을 기반으로 각각 op_TPC, OP_MPC, ref_MPC, 원본 영상을 비교한 그림은 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 영상을 통해서 불균일도 완화를 확인할 수 있었지만 보다 정확한 비교를 위해 흑체 온도에 따른 평균 영상을 기반으로 4가지 모델에 대해서 불균일도를 측정하였다. Fig. 7에서 흑체 온도에 따른 불균일도(SN)의 분포를 확인할 수 있다. 실험 결과, 전체 온도 구간에 대해 고르게 퍼져 있던 보정점을 사용하는 기존 MPC 대비 비선형 특성을 고려한 보정점을 사용하는

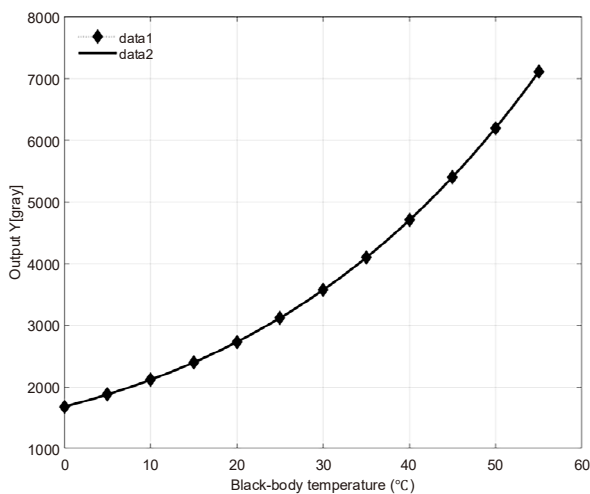


Fig. 3. Response characteristic curve

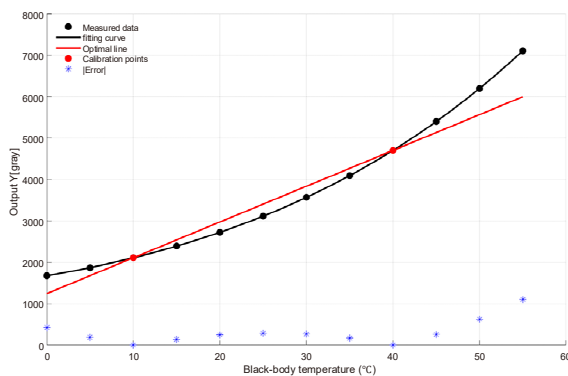


Fig. 4. Optimized calibration points for two-point NUC

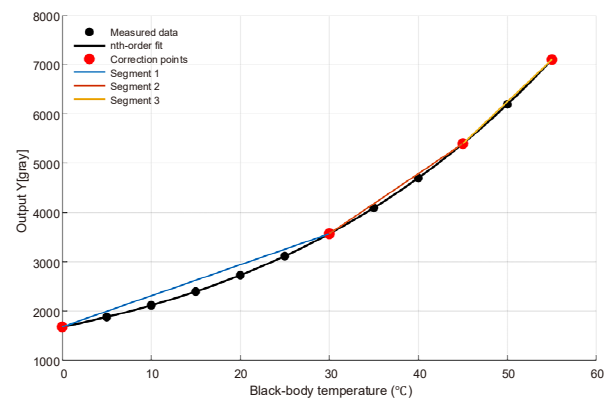


Fig. 5. optimized calibration points for multi-point NUC

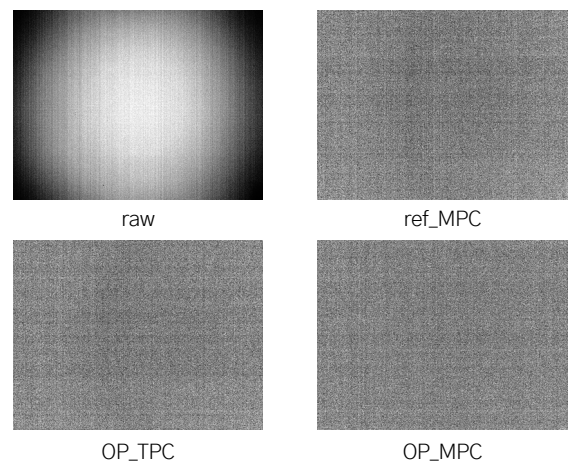


Fig. 6. Evaluation of video quality for the four calibration cases

op_MPC 방식을 적용한 결과, 비선형 특성이 커지는 흑체 온도 45°C 이상 구간에서 spatial noise(SN)값이 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 optimized calibration points for two-point NUC을 적용한 2point NUC에서 기존 MPC와 비교했을 때 고온 표적 대상 불균일도 측면에서 우위를 보이는 것을 확인하였다.

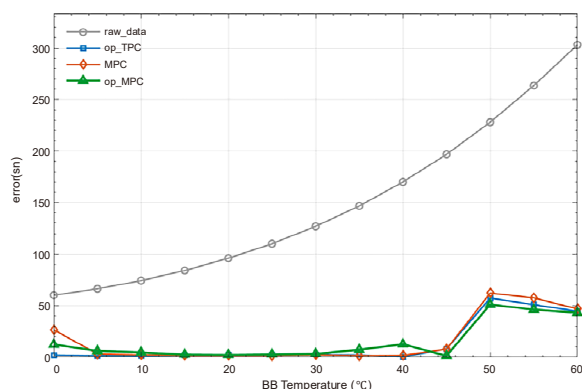


Fig. 7. Optimized calibration points for multi-point NUC

5. 결론

본 논문에서는 적외선 영상의 품질을 저하시키는 주요 원인인 픽셀 간 반응 불균일도를 효과적으로 개선하기 위해, 픽셀의 비선형 응답 특성을 반영한 최적 보정점 선택 기반의 calibration NUC(CBNUC) 방식

을 제안하고 그 성능을 분석하였다.

연구 결과, 픽셀의 비선형성을 모델링하여 도출한 최적 보정점을 적용했을 때 기존의 일률적인 보정 방식을 사용한 MPC 대비 영상의 불균일도가 유의미하게 개선됨을 확인하였다. 특히 픽셀의 비선형 특성이 두드러지는 흑체 온도 45°C 이상의 고온 영역에서 op_MPC 방식이 spatial noise(SN)를 효과적으로 감소시켜 가장 우수한 영상 품질을 보였다. 또한, 하드웨어 자원이 제한적인 환경을 고려하여 제안한 op_TPC 방식 역시 기존 MPC 대비 고온 표적에 대한 불균일도 측면에서 우위를 점하는 결과를 얻었다.

결론적으로, 적외선 영상의 보정 성능을 최적화하기 위해서는 단순한 보정 포인트의 개수 증가보다 검출기 소자의 실제 응답 특성을 정밀하게 분석하여 최적의 보정 구간과 지점을 설정하는 것이 더욱 효율적임을 입증하였다. 따라서 최상의 영상 품질 구현을 위해서는 optimized MPC를, 하드웨어 구현의 편의성과 효율성을 중시하는 경우에는 optimized TPC를 선택하는 것이 적절한 대안이 될 수 있다고 생각된다.

참고문헌

- [1] Li-feng Mian, Qian Xu, Ming-tao Zhang, De-xin Sun, & Yin-nian Liu, "Real-Time Implementation of Multi-Point Nonuniformity Correction for IRFPA Based on FPGA," in proceedings of International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009, VOL. 7383, 2009.