

논문 2017-12-11

TEC-less 비냉각 열영상 검출기용 소형카메라 모듈 개발

(Small Camera Module for TEC-less Uncooled Thermal Image)

김종호*
(Jong-Ho Kim)

Abstract : Thermal imaging is mainly used in military equipment required for night observation. In particular, technologies of uncooled thermal imaging detectors are being developed as applied to low-cost night observation system. Many system integrators require different specifications of the uncooled thermal imaging camera but their development time is short. In this approach, EOSYSTEM has developed a small size, TEC-less uncooled thermal imaging camera module with 32×32 mm size and low power consumption. Both domestic detector and import detector are applied to the EOSYSTEM 's thermal imaging camera module. The camera module contains efficient infrared image processing algorithms including : Temperature compensation non-uniformity correction, Bad/Dead pixel replacement, Column noise removal, Contrast/Edge enhancement algorithms providing stable and low residual non-uniformity infrared image.

Keywords : TEC-less, 17um pitch, Uncooled thermal image

1. 서론

국방 분야에서 야간 관측이 필요한 장비에는 필수적으로 열영상을 주로 적용한다. 특히 비냉각 열상 검출기의 기술이 급속히 발전하면서 저가의 장비에도 야간 관측을 위해 열영상을 적용할 수 있는 상황이다. 현재 국내를 포함해서 세계적으로 17um [1] 픽셀 크기의 비냉각 검출기가 주로 양산되고 있고 몇몇 국가에서는 12um 픽셀 크기의 비냉각 검출기를 양산하거나 양산 준비를 하고 있으며 향후 지속적으로 비냉각 검출기 기술이 발전될 것으로 전망된다.

이러한 상황에서 열영상을 구현하기 위해 적용 시스템마다 열영상 처리 하드웨어 및 소프트웨어를 반복적으로 개발 및 제작하기보다는 독립적인 열영상 처리 카메라 모듈을 개발하고 이 카메라를 여러

시스템 (열 영상 조준경, 열 영상 조종수 잠망경, 열 영상 관측경 등)에 적용하여 시스템의 개발 시간을 단축시킬 필요성이 생기게 되었다. 이러한 필요성을 충족시키기 위해 국내에서는 2013년부터 소형, 경량, 저 소비전력의 열영상 카메라 모듈을 개발해왔다. 이 기간 중 2013 ~ 2014년도에는 640×480급 17um 픽셀 피치의 검출기를 이용하여 크기 45×35 mm, 소비전력 2.1W의 열영상 카메라 모듈 (Fig. 1(a) 참조)을 개발 하여 열상 조준경, 다기능 관측경, 야간 관측경등 (Fig. 1(b) ~ (d) 참조)의 제품에 적용하였다.

2015년도에는 640×480 및 384×288급 17um 픽셀 피치의 검출기를 이용하여 32×32 mm, 소비전력 1.9W의 열영상 카메라 모듈 (Fig. 2 참조)을 개발 하였고 개발 과정의 카메라 모듈의 이름을 각각 검출기 크기에 따라 SETTTI¹⁾320, SETTTI640으로 하였다.

특히 2015년도에 개발된 SETTTI 모듈은 검출기

*Corresponding Author (jhkim@eosystem.com)

Received: Feb. 2 2017, Revised: Feb. 7 2017,

Accepted: Feb. 13 2017.

J.H. Kim: Chonbuk National University, R&D of Eosystem

© IEMEK J. Embed. Sys. Appl. 2017 Apr. 12(2) 97-103
ISSN : 1975-5066
http://dx.doi.org/10.14372/IEMEK.2017.12.2.97

1) Small Engine with TEC-less Technology for uncooled Thermal Imager의 약자로 국내에서 자체 개발한 비냉각 열영상 카메라 모듈의 고유 이름임.



그림 1. SETTTI640 (45×35 mm) 및 적용 제품
Fig. 1 SETTTI640 (45×35 mm Size) and Products

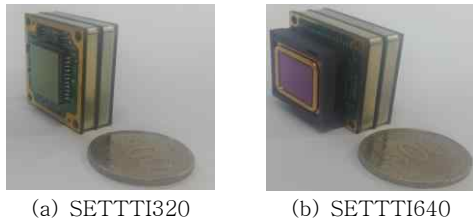


그림 2. SETTTI module (32×32 mm 크기)
Fig. 2 SETTTI module (32×32 mm Size)

의 구동보드만 교체하고 열영상 처리는 동일한 보드를 사용할 수 있게 개발되었다.

이중 320급 검출기를 적용한 SETTTI320 (Fig. 2(a). 참조)은 차기소총 사통장치 개선시체에 적용하였고, 640급 검출기를 적용한 SETTTI640 (Fig. 2(b). 참조)은 야간 관측경 및 조준경 등에 적용할 계획이다.

본 논문 2장에서는 SETTTI 모듈에 적용된 검출기들의 사양에 대해 언급하고, 3장에서는 SETTTI 모듈에 적용된 열영상처리 알고리즘에 대해 언급하였다. Tec-less 검출기를 적용할 때 고려되어야하는 온도 보정알고리즘 [2]을 실험적 검토를통해서 FPGA에 구현가능한 형태로 제안하였다. 그리고 온도보정 이후에 잔여 노이즈를 제거하기위한 SBNUC (Scene Based NUC)의 잔상효과를 최소화하는 알고리즘 [3]을 개선한 세로패턴의 잡음 제거 알고리즘을 소개한다. 마지막 4장에서는 개발된 SETTTI 모듈의 상세 사양을 언급하였다.

표 1. TEC 내장형 검출기와 비 내장형 검출기 비교
Table 1. Compare detector with TEC and detector without TEC

Items	Detector with TEC	Detector without TEC (TEC-less Detector)
Shape		
Size (L×W×H)	41×30×7.4 mm	24×24×3.6 mm
Weight	28 g	6.5 g
Format (Pixel pitch)	640×480 (17 um)	640×480 (17 um)

표 2. 적용 검출기 사양
Table 2. Detector specifications of camera module

Items	320급 검출기	640급 검출기
Shape		
Size (L×W×H)	16.5×15.9×2.9 mm	24×24×3.6 mm
Weight	4 g	6.5 g
Pixel Pitch	17 um	←
Format	384×288	640×480
Package	Ceramic	←
Operability	≥ 99.5%	←
Operating Temp	-40 ~ 65 ℃	←
NETD ²⁾	< 40 mk	←

II. 적용 검출기 사양

SETTTI 모듈은 17um 픽셀 피치의 TEC-less 형태의 검출기를 적용하였다. TEC-less 형태의 검출기는 검출소자의 온도를 안정화하기 위한 TEC (Thermoelectric Cooler) 소자가 없는 검출기이다. TEC가 내장된 검출기는 TEC 구동 회로가 필요하여 카메라 모듈의 소모전력 및 크기가 커질 수밖에 없다. 또한 검출기에 TEC가 내장되어 있어서 검출기 자체의 크기가 크므로 모듈의 크기를 소형화 하는데 한계가 있는 반면 TEC-less 형태의

2) Noise Equivalent Temperature Difference의 약자로 검출기의 성능을 나타내며 작을수록 좋음. ※ Table 2.는 320급 검출기와 640급 검출기의 성능 비교표가 아니라 SETTTI320, SETTTI640에서 적용한 검출기 사양을 정리한 것임.

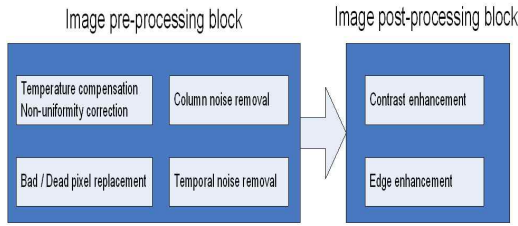


그림 3. SETTTI 영상처리 구성
Fig. 3 SETTTI Image processing concept

검출기는 소형의 세라믹 패키지의 형태로 크기와 무게 측면에서 많은 장점을 가지고 있다 (Table 1. 참조). 그러나 TEC-less 검출기는 검출기의 온도 안정화를 위해 추가적인 보상처리가 필요하며, 관련 내용은 3절에서 언급하였다.

SETTTI 모듈을 소형화하기 위해서 TEC-less 형태의 검출기를 사용하였으며, 시스템에 최적화된 카메라 모듈을 제공하기 위해 384×288, 640×480 17 um 픽셀 피치의 검출기를 모두 적용 할 수 있도록 하였다. 각각의 검출기 사양은 Table 2.와 같다.

III. 영상 처리

SETTTI 모듈의 영상 처리는 전처리 (Pre-processing) 와 후처리 (Post-processing)의 두 부분으로 나누어진다 (Fig. 3. 참조). 전처리 부분에서는 TEC-less 검출기의 사용으로 인한 온도 보상기반의 불균일 보정 (Temperature compensation non-uniformity correction), 결점화소 대체 (Bad/Dead pixel replacement), 세로노이즈 제거 (Column noise removal), 시변노이즈 제거 (Temporal noise removal) 순으로 처리된다. 전처리의 결과는 후처리 블록에서 대조비 개선 (Contrast enhancement), 경계선 개선 (Edge enhancement)등의 과정을 거쳐 최종 영상 출력을 한다.

3.1. 전처리 과정

SETTTI 모듈의 전처리 과정에서는 검출기의 불균일 잡음을 제거하는 처리를 수행한다. 열 영상 검출기는 각 픽셀 마다 오프셋 및 이득의 특성이 다르므로 이를 보정해주어야 한다. 특히 오프셋은 검출기 주변 온도에 민감하게 변하여 영상을 관측하는 과정에서도 서터나 균일한 온도 면을 이용하여

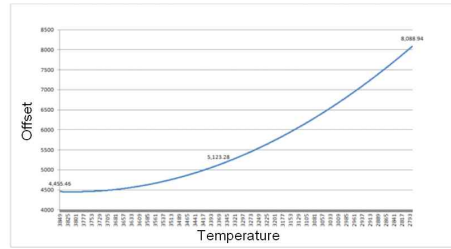


그림 4. 오프셋 계수와 검출기 온도 관계
Fig. 4 Offset Vs FPA temperature

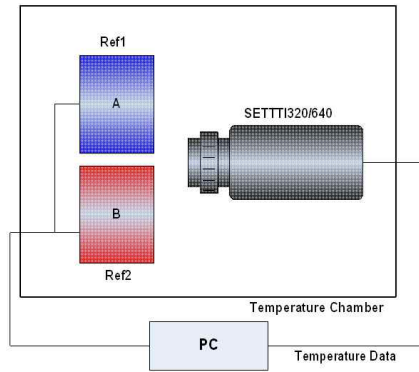


그림 5. 보정 환경 구성
Fig. 5 Basic factory calibration setup

오프셋 보정을 해주어야한다. SETTTI 모듈은 오프셋 보정 빈도를 최대한 줄이기 위해서 다음과 같은 처리들을 수행한다.

3.1.1 온도 보상 불균일 보정 처리 (Temperature compensation non-uniformity correction)

TEC-less 검출기는 검출기를 기준 온도로 설정할 수 없으므로 검출기 주변 온도에 따라 각 픽셀들의 오프셋을 보상해주어야 한다.

$$y_{i,j} = G_{i,j}x_{i,j} + O_{i,j}(T) \quad (1)$$

$$O_{i,j}(T) = a_{i,j}T^2 + b_{i,j}T + c_{i,j} \quad (2)$$

식 (1)은 불 균일 보정의 이득 및 오프셋 계수를 이용한 보정 방식이다 [2]. 여기서 y 는 보정 결과, G 는 검출기 이득 보정 계수, O 는 오프셋 보정 계수, x 는 불 균일 데이터이다. 그러나 O 는 TEC-less 검출기의 특성을 고려하여 검출기 주변 온도에 따라 결정되어야한다.

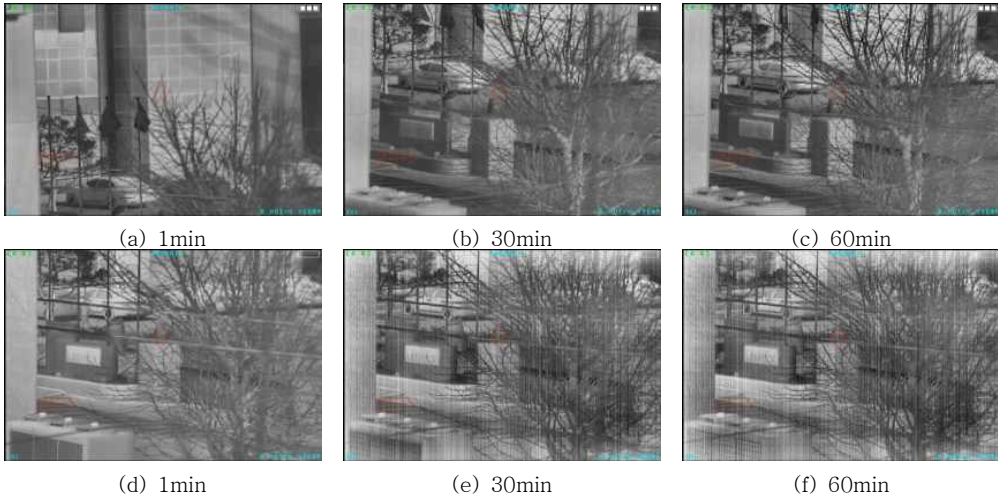


그림 6. 온도 보상 불균일 보정 적용 및 비적용 영상

Fig. 6 Temperature compensation non-uniformity correction images(a, b, c) and constant offset non-uniformity correction images(d, e, f)

비 냉각 검출기의 불 균일 보정을 위한 이득 계수는 검출기의 동작 구간에서 일정한 반면 오프셋 계수는 Fig. 5와 같은 환경에서 온도를 변화시켜가며 오프셋을 측정하였을 때 Fig. 4와 같은 형태로 출력되어 식 (2)와 같이 검출기 온도에 따른 2차식의 형태를 얻을 수 있다 [4]. SETTTI 모듈은 이 오프셋 값을 Fig. 5와 같은 보정 환경을 구성하여 10 ~ 15 °C 간격으로 온도챔버를 변화시켜 가며 얻은 각 픽셀의 값들을 이용하여 미리 공정상에서 식 (2)의 a, b, c 계수를 구한 후 검출기 주변 온도 T가 변할 때 오프셋이 보정되도록 하는 온도 기반 불 균일 보정 방법을 적용하였다. Fig. 6.은 균일한 기준 온도 면을 이용해서 오프셋 보정을 수행 후 1분, 30분, 60분의 시간이 지남에 따라 식 (1)의 온도 보상 불 균일 보정을 적용하였을 때 영상들 (Fig. 6.(a), (b), (c))과 적용하지 않았을 때의 영상들 (Fig. 6.(d), (e), (f))을 시간 별로 비교한 것이다. Fig. 6.에서 알 수 있듯이 시간이 지남에 따라 검출기의 온도가 변하고, 이를 보상하기 위해 온도 기반 불 균일 보정을 적용한 영상이 우수함을 알 수 있다.

3.1.2 결점 화소 대체(Bad/Dead pixel replacement)

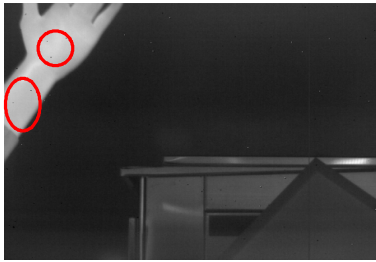
비 냉각 검출기의 제조사들은 검출기 동작률 (Operability)이 99.5%이상이면 정상 검출기로 판단하고 시스템 제조사에 공급한다. 640×480 검출기

경우 약1500개 이하의 픽셀들이 적외선 신호에 응답하지 않거나 비정상적으로 반응한다. 이러한 픽셀 들은 주변의 픽셀로 대체하여 사용자가 열 영상을 관측하는데 불편함이 없도록 해야 한다. SETTTI 모듈은 결점 화소를 가장 인접한 왼쪽 정상 픽셀로 대체하는 방식을 적용한다. 이 방식은 검출기 제조사가 검출기의 결점화소 개수뿐만 아니라 연속적인 결점화소 개수도 관리하므로 간단하지만 효과가 좋은 방식이다 (Fig. 7 참조). 여기서 결점화소의 판단은 공정상에서 식 (1)의 이득 계수를 구하는 과정에서 픽셀의 감응도의 평균에서 ±30%를 벗어나는 픽셀들을 결점화소로 판단하고, 이 정보를 이득 계수에 같이 저장하여 사용하도록 하였다.

3.1.3 세로 노이즈 제거 (Column noise removal)

온도 보상 불균일 처리 (3.1.1 항)를 수행하여도 세로 패턴의 잔여 불균일 (Residual non-uniformity) 잡음이 존재한다. 이 잡음은 온도 분포가 다양한 상황에서는 무시할 수 있으나 그렇지 못한 상황에서는 Fig. 3.의 후처리 결과 최종 영상 출력에 Fig. 8.의 영상들처럼 세로 패턴의 고정 잡음이 나타나게 된다. 특히 이러한 현상은 세로 방향으로 출력 버퍼를 공유하는 검출기 ROIC (Read out integrated circuit)의 구조 때문이다 (Fig. 9. 참조).

세로 방향의 고정 패턴을 제거하기 위해서 배경 기반 불균일 보정 기법 (Scene based non-uniformity



(a) Before BPRP³⁾ image



(b) After BPRP image

그림 7. 결점화소 대체 결과

Fig. 7 Bad/Dead pixels replacement result



(a) Indoor image (b) Laboratory image

그림 8. 세로 노이즈 영상

Fig. 8 Images of column noise

correction) [3] 이나 단일 영상에서 세로 패턴의 노이즈를 추출하여 보정하는 방식이 있다. 배경 기반 불균일 보정 방식은 세로 패턴의 노이즈를 효과적으로 제거하나 영상에 잔상이 발생하는 단점이 있어 SETTTI 모듈은 후자의 방식을 적용하였다.

$$cNoise_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_{i,j} (y_{i,j+1} - y_{i,j}) \quad (3)$$

식 (3)에서 i, j 는 영상의 행과 열의 index이고, y 는 식 (1)의 온도 보상 불균일 보정 결과이다. 식 (3)은 세로 패턴의 노이즈는 인접하는 세로 방향의 실제 정보와 상관관계가 없이 일정하다는 성질을

3) Bad Pixel Replacement의 약자

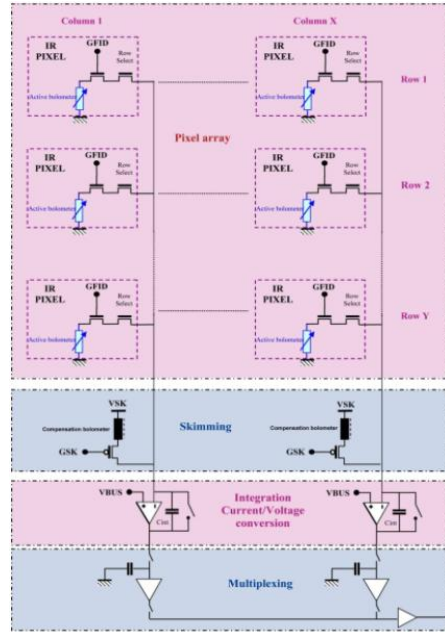


그림 9. 비냉각 검출기 구조

Fig. 9 Structure of uncooled infrared detector's ROIC [4]



(a) Indoor image (b) Laboratory image

그림 10. 세로노이즈 제거 영상

Fig. 10 Images of column noise removal

이용한 것으로 $w_{i,j}$ 는 인접픽셀의 윈도우의 Gradient 성분과 분산성분의 크기의 합으로 인접 픽셀들의 차성분 ($y_{i,j+1} - y_{i,j}$)이 크면 같이 증가하는 성분이므로 이두성분의 비율이 일정한 신호가 세로노이즈로 볼 수 있다. SETTTI 모듈은 식 (3)을 통해 얻은 세로방향의 노이즈의 성분을 식 (1)에 빼주어 세로 패턴의 노이즈를 제거하여 영상의 불균일을 감소시킨다 (Fig. 10. 참조).

3.2 후처리 과정

후처리 과정에서는 전처리 과정을 통해서 불균일 보정된 영상을 전시 가능한 256 그레이 레벨로 변환하는 처리 및 예지 성분 강조를 수행한다. 이런

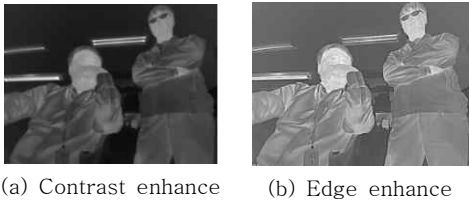


그림 11. SETTTI 후처리 결과 영상
Fig. 11 SETTTI's post-processed image

과정에 적용하는 여러 알고리즘이 있다 [5, 6]. SETTTI 모듈은 Bilateral filter와 Dynamic range partitioning (BF&DRP) [7]의 알고리즘을 변형하여 적용하였다. 이 알고리즘을 적용한 이유는 대조비 개선과 함께 에지도 강조할 수 있는 장점이 있기 때문이다 (Fig. 11 참조).

IV. SETTTI (소형 비냉각 열영상 카메라 모듈) 사양

SETTTI 모듈은 앞의 3장에서 언급한 알고리즘들을 구현하기 위해 Xilinx사의 Spartan6 계열의 FPGA인 xc6slx75csg484를 사용하였다. FPGA의 내부는 열영상 알고리즘 구현과 함께 시스템 연동을 위한 통신제어용 주변 장치로 이루어져 있고, 이들의 제어위위한 소프트웨어 코어를 포함하고 있다 (Fig. 11 참조).

Fig. 12에서 TCNUC, BPR, Fixed Column Noise Remove 블록들은 전처리 Fig. 3의 전처리 과정에 해당되며, Contrast&Edge Enhance 블록은 후처리 과정에 해당된다. 이들 블록들은 AXI Lite BUS를 통해서 소프트웨어 코어의 제어를 받는다. 메모리 제어블록 (Memory Control Block)은 전처리 과정에서 필요한 영상데이터의 프레임버퍼 역할을 하는 LPDDR (Low Power Double Data Rate)메모리를 제어하는 역할을 하는데 데이터의 경로는 AXI M-BUS에 연결이되어 고속의 데이터 이동이 가능하도록 하였다.

Table 3은 Fig. 12과 같은 구조의 FPGA가 적용된 SETTTI 모듈의 사양을 정리하였다.

Table 3.에서 SETTTI640이 SETTTI320에 비교해서 소모전력이 높은 이유는 사용 검출기의 포맷차이로 인한 것이다. 그리고 SETTTI 모듈은 RS232통신을 이용하여 모듈을 제어할 수 있도록 하였다. 향후 USB또는 이더넷을 적용하여 고속 데이터 전송이 가능하도록 할 계획이다.

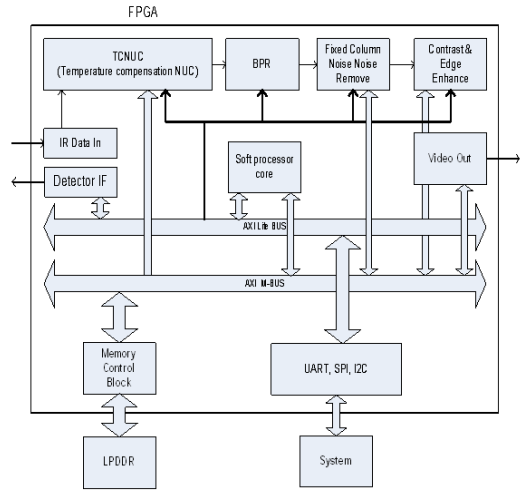


그림 12. SETTTI 영상처리 FPGA 구조
Fig. 12 SETTTI's image processing FPGA structure

Table 3. Key features of SETTTI modules

Items	SETTTI640	SETTTI320
Detector Format	640×480	384×288
Pixel Pitch	17 um	17 um
Wavelength	8 ~ 12 um	8 ~ 12 um
Power	< 1.9 W	< 1.2 W
Size	32×32×27	32×32×25
Weight	29 g	22 g
Input Voltage	5.3 ~ 5.5V	5.3 ~ 5.5V
Operating Temp	-35 ~ 45 ℃	-35 ~ 45 ℃
Serial Format	RS232	RS232
Digital Video Out	BT601	BT601
Analog Video Out	NTSC	NTSC

V. 결론

본 논문에서 EOSYSTEM에서 자체 개발한 비냉각 열영상 모듈인 SETTTI를 소개하였다. 시스템의 다양한 요구 조건을 신속하게 대응하기 위해 320급 검출기와 640급 검출기의 구동 보드를 제외하고 공통 모듈화 하였다. 모듈의 소형화를 위해 TEC-less 검출기를 사용하였고, 소형 경량 모듈을 구현하기 위한 온도보상 불균일 처리 및 비냉각 열상 검출기에 적합한 영상처리 알고리즘을 적용하였다. 이 모듈은 다양한 야간 관측용 군사 장비에 적용될 예정이다.

References

- [1] J. L. Tissot, P. Robert, A. Durand, S. Tinnes, E. Bercier, A. Crastes, "Status of Uncooled Infrared Detector Technology at ULIS, France," *Defence Science Journal*, Vol. 63, No. 6, pp. 545-549, 2013.
- [2] P. E. Howard, J. E. Clarke, C. C. Li, J. W. Yang, W. Y. Wong, A. Bogosyan, "Recent Advances in TEC-Less Uncooled FPA Sensor Operation," *Proceedings of AeroSense International Society for Optics and Photonics*, pp. 527-536, 2003.
- [3] F. Fan, Y. Ma, J. Huang, Z. Liu, "A Combined Temporal and Spatial Deghosting Technique in Scene Based Nonuniformity Correction," *Infrared Physics & Technology*, Vol. 71, pp. 408-415, 2015.
- [4] Y. Cao, C. Tisse, "Shutterless Solution for Simultaneous Focal Plane Array Temperature Estimation and Nonuniformity Correction in Uncooled Long-wave Infrared Camera," *Applied Optics*, Vol. 52, No. 25, pp. 6266-6271, 2013.
- [5] S. Weith-Glushko, C. Salvaggio, "Quantitative Analysis of Infrared Contrast Enhancement Algorithms," *Proceedings of Defense and Security Symposium on International Society for Optics and Photonics*, pp. 65430S-65430S 2007.
- [6] C. Zuo, Q. Chen, N. Liu, J. Ren, X. Sui, "Display and Detail Enhancement for High-Dynamic-Range Infrared Images," *Optical Engineering*, Vol. 50, No. 12, pp. 127401-127401, 2011.
- [7] F. Branchitta, M. Diani, G. Corsini, M. Romagnoli, "New Technique for the Visualization of High Dynamic Range Infrared Images," *Optical Engineering*, Vol. 48, No. 9, pp. 096401-096401, 2009.

Jong-Ho Kim (김종호)



He is received B.S. and M.S. degree in electronic engineering from Kyunghee University in 1995 and 1997.

From 1997 to the present he has worked for R&D of Eosystem. He is currently pursuing his PhD degree in Dept. of Nano Science and Technology the Graduate School of Chonbuk National University. His research interests are uncooled infrared system, embedded linux device driver, FPGA, SOC.

Email: jhkim@eosystem.com