



특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제29권 제2호, 2024년 3월 (JBE Vol.29, No.2, March 2024)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2024.29.2.154>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

실시간 영상처리를 위한 적외선 영상 기반의 FPGA 설계 및 HW/SW 시스템 개발 연구

안 해 성^{a)}, 김 상 우^{a)}, 서 성 교^{a)}, 손 원 규^{a)}, 오 민 택^{a)}, 박 승 욱^{a)†}

A Study on the Development of FPGA Design and Hardware/Software System based on Infrared Image for Real-time Image Processing

Haesung Ahn^{a)}, Sangwoo Kim^{a)}, Seong-gyo Seo^{a)}, Wongyu Son^{a)}, Mintaek Oh^{a)}, and Seungwook Park^{a)†}

요 약

본 논문에서는 적외선(infrared) 영상 기반 실시간(real-time) 영상처리(image processing) 시스템을 위한 HW/SW (hardware/software) 개발과 FPGA (filed-programmable gate array) 설계 방법에 대해 제시한다. 실시간 영상처리를 위해 HW 및 SW 개발, 통신 패킷 구조, 실시간 영상 전처리를 위한 블록도에 대해 기술한다. 전처리 제어 단계에서 2-point NUC (non-uniformity correction)를 이용한 불균일보정 방법과 주변 픽셀의 평균 값으로 대체하는 불량픽셀보정(defective pixel correction) 방법을 활용하여, 적외선 영상 이미지의 품질을 개선시킬 수 있는 FPGA 설계 방법을 제시한다. 실험 결과는 적외선 원 영상 대비 불균일보정 방법과 불량픽셀보정 방법을 수행한 적외선 영상 이미지 품질에 대해서 비교하고 평가한다. 불균일보정을 적용한 적외선 영상은 원 영상에 비해 품질과 분해능(resolution)이 향상됨을 확인할 수 있다. 또한, 불균일보정에서 불량픽셀보정을 적용한 적외선 영상은 불균일보정만 적용한 적외선 영상보다 개선된 영상으로 관찰됨을 보여준다.

Abstract

This paper presents development HW/SW (hardware/software) and FPGA (filed-programmable gate array) design scheme for real-time image processing system based infrared image. It describes hardware and software development for real-time image processing, communication packet structure, and block diagram for real-time image pre-processing. Furthermore, this paper proposes an FPGA design scheme to improve the quality of infrared images. The scheme uses a non-uniformity correction scheme with a two-point NUC scheme and a defective pixel correction scheme that replaces the average value of the surrounding pixels in the pre-processing control stage. The results of the experiments compare and evaluate the quality of the infrared images obtained using the non-uniformity correction and defective pixel correction schemes. It can be seen that the quality and resolution of the infrared image to which the non-uniformity correction is applied is improved compared to the original image. It also shows that the infrared image to which defective pixel correction is applied in non-uniformity correction is observed as an improved image compared to the infrared image to which only non-uniformity correction is applied.

Keyword : FPGA, Defective pixel correction, Image processing, Infrared, Non-uniformity correction

Copyright © 2024 Korean Institute of Broadcast and Media Engineers. All rights reserved.

“This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and not altered.”

I. 서론

감시정찰체계는 지상, 해상, 항공, 해양, 우주의 전략과 전술 및 전장 환경에 대한 정보를 수집하고 획득하여, 영상 신호를 제공하는 무기체계를 의미한다. 광역 감시 및 탐지를 위한 감시정찰체계의 EO/IR (electro-optical/infrared) 기술은 전장의 운용성과 전투 효율성을 향상하도록 자율화와 소형화를 접목시켜 발전하고 있다. EO/IR 기술이 발전함에 따라 EO/IR 장비의 주요 구성품인 광학창, 검출기, 전자보드 등 영상신호처리에 대한 기술개발에 대한 중요성이 대두되고 있다.

감시정찰체계의 EO/IR 장비는 목적에 따라 표적 탐지, 추적 등 다양한 방식으로 운용된다. EO/IR 장비에서 사용하는 적외선 검출기(infrared radiation detector)는 적외선 파장의 에너지를 받아 전류 및 전압의 변화를 이용하여 영상신호를 생성하기 때문에 주, 야간 24시간 운용이 가능하다^{[1][2]}. 그 중에서도 중적외선(mid-wave infrared : MWIR) 검출기는 연기와 먼지, 안개, 대기중의 산란의 영향이 비교적 적어 감시정찰체계에서 주로 열 영상을 획득하기 위해 사용된다. 그러나, 적외선 검출기는 구조가 복잡하며, 낮은 대조비와 높은 배경잡음 등 검출 소자 간의 불균일성이 높게 나타난다. 최근에는 더 작고 집적화가 이루어진 초점면 배열(focal plane array : FPA) 형태로 발전이 이루어지며^[3], 화소(pixel)간의 불균일성과 불량픽셀(defective pixel)의 문제가 대두된다. 이를 보완하기 위해 FPGA를 통해 CPU의 처리과정을 줄이는 영상 전처리 기능을 수행하며, 소형 및 경제성이 높은 신호처리보드를 설계하여 사용 가능하다. 본 논문에서는 FPGA (field-programmable gate array)를 이용하여 실시간 영상 전처리 기능을 설계하였으며, 불균일보정(non-uniformity correction : NUC)과 불량픽셀보정 방법에 대해 기술한다.

적외선 검출기 성능이 끊임없이 발전함에 따라 픽셀 피

치(pitch)의 간격이 작아지고, 해상도가 높아지게 되면서 비정상적인 시변 응답 특성을 갖는 불균일이 적외선 영상 이미지에 나타난다^{[4][5]}. 또한, 적외선 검출기에서 출력되는 적외선 영상 이미지는 불균일 특성뿐만 아니라 특정 픽셀 부분에서 비정상적인 응답 특성을 갖는 불량픽셀이 발생하여, 적외선 영상의 품질을 저하시킨다. 저하된 적외선 영상 이미지는 불균일보정 방법과 불량픽셀보정 방법을 이용하여, 적외선 영상 이미지의 품질을 개선시킬 수 있다. 불균일보정은 균일한 배경온도를 가지는 보정 장비인 흑체(black body)를 이용하여 높은 온도와 낮은 온도의 픽셀 값을 추출하여, 검출기 픽셀 간의 선형관계를 이용하여 이득(gain)과 오프셋(offset) 값을 획득하여 보정하는 방식으로 적외선 검출기의 불균일성을 해결하는 방법이다^{[6][9]}. 불균일보정 기법 중 대표적인 방법은 2-point NUC 방법이 있으며^[10], 정확한 이득과 오프셋 값을 획득 가능하고 구현하기 용이하다는 장점이 있다. 불량픽셀은 불균일보정을 수행하고 온도 변화에 따라 픽셀의 출력 값이 변하지 않고 일정한 출력 값을 가지는 데드 픽셀(dead pixel)과 정상 픽셀의 기준을 만족하지 못하는 베드 픽셀(bad pixel)을 의미하며, 불량픽셀보정은 해당 불량픽셀에 인접한 픽셀을 이용하여 보정하는 방법이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 적외선 영상 기반 실시간 영상처리시스템을 위한 HW 및 SW 구조에 대해 기술한다. 3장에서는 FPGA 설계 방법에 대해 설명하며, 2-point NUC 방법을 이용한 불균일보정 방법과 불량픽셀보정 방법을 제시한다. 4장에서는 실험 결과로 적외선 원영상과 불균일보정 방법 및 불량픽셀보정 방법을 적용한 영상을 통해 표적 식별 여부와 분해능(resolution)에 대해 평가하고, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 구조

1. 적외선 영상 기반 실시간 영상처리 시스템을 위한 HW 구조

그림 1은 적외선 영상 기반의 실시간 영상처리시스템에

a) LIG 넥스원(LIG Nex1)

‡ Corresponding Author : 박승욱(Senugwook Park)

E-mail: seungwook.park@lignex1.com

Tel: +82-31-326-9291

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8817-7284>

· Manuscript 22 February, 2024; Revised 26 February, 2024; Accepted 26 February, 2024.

대한 HW 블록 다이어그램을 나타낸다. 전원(power) 28V가 인가될 시, 적외선 검출기에서 출력되는 적외선 영상 이미지를 카메라링크(camera-link)를 통해 수신되며, 수신된 적외선 영상 이미지는 2-point NUC 방법을 이용한 불균일보정을 수행한다. 2-point NUC 방법으로 각 픽셀의 이득과 오프셋 값을 획득하여 보정 값을 구하고, 불균일보정 테이블(NUC table)에 픽셀 별로 미리 계산된 보정 값을 맵핑(mapping)한다. 불균일보정 테이블은 비휘발성 특성을 갖는 플래시 메모리(flash memory)에 업로드(upload)하며, 전원 인가 시 플래시 메모리(flash memory)에 장입되어 있는 불균일보정 테이블이 DDR 메모리에 저장된다. 적외선 영상 이미지의 불균일보정은 픽셀마다 불균일보정 테이블에 맵핑 되어있는 보정 값에 따라 수행되며, 픽셀 별로 실시간 영상처리를 수행한다. 이어서, 적외선 영상 이미지의 불량픽셀보정은 플래시메모리에 불량픽셀보정 (dead/bad pixel correction) 테이블을 장입하며, 불균일보정과 같은 방법으로 영상처리를 수행한다. 2-point NUC를 이용한 불균일보정 방법과 불량픽셀보정 방법은 3장에서 자세하게 설명한다. 불균일보정과 불량픽셀보정을 순차적으로 수행된 적외선 영상 이미지는 영상 포맷(video format)을 LVDS (low-voltage differential signaling) 인터페이스로 변환(conversion)하여 적외선 영상을 전송한다.

2. 적외선 영상 실시간 영상처리 시스템을 위한 SW 구조

그림 2는 적외선 영상 기반의 실시간 영상처리시스템에 대한 SW 순차 다이어그램을 나타낸다. 여기서, 사용자(user)는 장비(equipment)를 운용하는 운용자이며, 체계(system)는 사용자의 명령을 각 부체계(sub-system)에 전달하는 역할을 하며, 부체계는 체계의 명령을 수행하는 장비로 본 논문에서의 영상처리시스템을 의미한다. 부체계 FPGA는 적외선 영상 이미지를 실시간으로 영상처리를 수행하는 그림 1의 ZYNQ를 나타낸다. 사용자는 적외선 영상 이미지에 불균일보정을 수행할 수 있도록 체계에 불균일보정 요청을 송신한다. 불균일보정 요청을 수신한 체계에서는 사용자의 요청 내용을 부체계에 전달한다. 수신한 부체계에서는 사용자 및 체계의 요청을 처리하기 위해 부체계 FPGA에게 불균일보정 셋팅 값을 송신한다. 수신한 부체계 FPGA는 불균일보정 셋팅 값에 따라 불균일보정을 수행하고, 부체계에게 응답한다. 불균일보정 셋팅의 응답을 받은 부체계에서는 사용자 요청에 응답하기 위해 체계에 전달하고, 체계에서는 사용자에게 불균일보정 셋팅 결과 값을 반환한다. 여기서, 반환된 셋팅 결과 값은 불균일보정이 수행된 적외선 영상 이미지를 의미한다. 이어서, 불균일보정이 수행된 적외선 영상 이미지에서 사용자가 불량픽셀보정을

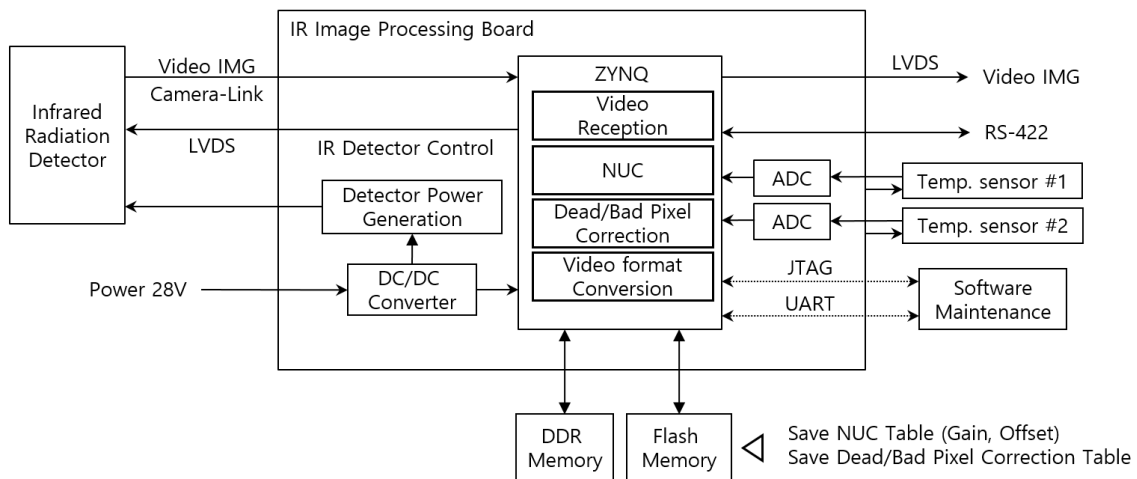


그림 1. 실시간 영상처리시스템에 대한 HW 블록 다이어그램
Fig. 1. Real-time image processing for hardware block diagram

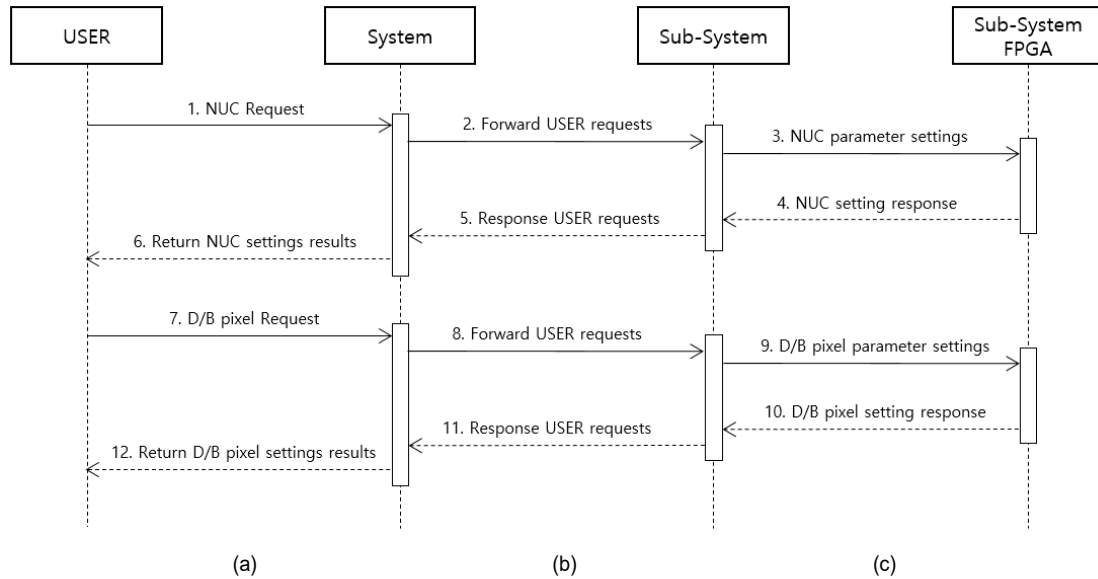


그림 2. 실시간 영상처리시스템에 대한 SW 순차 다이어그램
 Fig. 2. Real-time image processing for software sequence diagram

수행할 수 있도록 체계에 불량픽셀보정 요청을 송신한다. 이를 수신한 체계에서는 불량픽셀보정 요청을 수행할 수 있도록 부체계에 송신하고, 체계로부터 수신한 부체계에서는 요청을 처리하기 위해 불량픽셀보정 셋팅 값을 부체계 FPGA에 전달한다. 전달 받은 부체계 FPGA는 불량픽셀보정을 수행하고 부체계에 수행된 불량픽셀 셋팅 값을 부체계에게 응답한다. 부체계와 체계에서는 각각 부체계 FPGA로부터 전달받은 응답을 체계에 전달하고, 사용자에게 불량픽셀보정 셋팅 결과 값을 반환한다.

3. 적외선 영상 실시간 영상처리 시스템을 위한 통신 패키지 구조

체계와 부체계 간의 통신은 그림 3과 같이 서로 약속된 패키지 구조에 따라 통신을 수행하며, 본 논문에서의 체계와 부체계 간의 통신은 RS422 통신 방법을 사용한다. RS422의 패키지 구조는 헤더(header), 출발지(source), 목적지(desti-

nation), 시퀀스 수(sequence number), 데이터 크기(data size), 데이터(data), 체크섬(check-sum)의 포맷을 갖는다. 헤더는 체계와 부체계 간의 1바이트 크기로 임의의 서로 약속된 값을 가지며, 출발지와 목적지는 각각 체계와 부체계를 의미한다. 여기서, 체계와 부체계의 출발지와 목적지는 각각 체계와 부체계를 나타내고, 부체계와 체계를 나타낸다. 시퀀스 수는 패키지의 번호를 의미하고, 체계에서는 수신된 패키지를 통해 몇 번째의 패키지에 대한 응답을 수행했는지 확인할 수 있는 지표로 사용된다. 데이터 크기와 데이터는 각각 체계에서 부체계로부터 명령을 송신하는 데이터에 대한 크기와 정보를 담고 있는 데이터를 나타낸다. 체크섬은 체계에서 송신한 패키지를 수신한 부체계 또는 부체계에서 송신한 패키지를 수신한 체계에서 패키지가 정상인지 확인하기 위한 중복검사로 1바이트를 갖는다. 본 논문에서의 패키지에 대한 체크섬은 패키지의 모든 데이터 값을 더하여 발생하는 캐리(carry)는 무시하고, 최하위 비트(least significant bit : LSB)로부터 1바이트 값을 체크섬으로 사용한다.

Header	Source	Destination	Sequence Number	Data Size	Data	Check-Sum
--------	--------	-------------	-----------------	-----------	------	-----------

그림 3. 체계와 부체계 간의 RS422 통신 패키지 구조
 Fig. 3. Structure of packet for RS422 communication between system and sub-system

III. FPGA 설계 및 2-point NUC 방법을 이용한 불균일보정과 불량픽셀보정 방법

적외선 영상 기반의 실시간 영상처리시스템을 위해 적외선 영상 이미지를 개선시키는 2-point NUC 방법을 이용한 불균일보정과 불량픽셀보정 방법이 있으며, 두 가지 방법을 사용자 또는 부체계로부터 명령을 받아 수행할 수 있도록 그림 4와 같이 실시간 영상 전처리 블록도와 같이 FPGA를 설계하였다. 그림 2에서 불균일보정 셋팅을 송신하고 응답하는 3, 4번 메시지와 불량픽셀보정 셋팅을 송신하고 응답하는 9, 10번 메시지처럼 부체계와 부체계 FPGA는 서로 약속된 BRAM (block ram)을 통해 통신을 수행한다. FPGA 설계 시, 제어신호가 적고 복잡도가 낮은 BRAM은 메모리 맵(map)의 크기를 늘리거나 줄일 수 있고 양방향 통신이 가능하여 BRAM으로 설계하였다.

먼저, 불균일보정 셋팅 값을 수신한 부체계 FPGA의 프로세스는 AXI 인터페이스를 통해 PS (processing system)의 영상 전처리 제어(video pre-processing control)에서 PL (programmable logic)의 BRAM에 전달한다. PL에서는 BRAM에 접근하여 활성화 신호(enable signal) 값에 따라 불균일보정 수행을 결정한다. 영상 이미지의 픽셀에 필요한 이득과 오프셋 값은 영상 전용 AXI_stream 인터페이스

를 통해 DDR 메모리에 저장되어 있는 불균일보정 테이블로 불균일보정을 수행할 수 있게 된다. 다음으로, 사용자의 요청에 따라 불균일보정을 수행한 영상 이미지는 불량픽셀 보정을 수행할 수 있다. 부체계 FPGA는 불량픽셀보정 셋팅 값을 수신하여, 불균일보정과 동일한 방법으로 프로세스가 진행된다. AXI 인터페이스를 통해 PL의 BRAM에 전달하며, PL에서는 BRAM에 접근하여 불량픽셀 수행을 활성화 신호 값에 따라 불량픽셀보정 수행을 결정한다. 영상 이미지의 픽셀에 필요한 불량픽셀보정은 AXI_stream 인터페이스를 통해 DDR 메모리에 저장되어 있는 불량픽셀보정 테이블로 불량픽셀보정을 수행할 수 있다.

EO/IR 장비에서는 표적을 탐지하고 추적하는 알고리즘을 통해 임무를 수행하게 되며, 임무 수행을 위해 영상이 실시간으로 개선되어야 한다. 실시간 영상처리를 위해 본 논문에서 제시하는 FPGA 설계 방법은 전처리 제어 단계에서 적외선 영상 이미지를 개선하는 방법으로 탐지와 추적 알고리즘에 필요한 영상지연 요구사항을 충족한다. 그리고 영상 전용 AXI_stream 인터페이스 사용 및 VHDL (VHSIC Hardware Description Language)을 이용한 픽셀 단위의 영상처리는 프레임 단위의 영상처리보다 저지연(low latency)의 효과가 있다. 대부분의 검출기는 공용화된 인터페이스가 아닌 자체 인터페이스를 사용하기 때문에, 검출기가 다

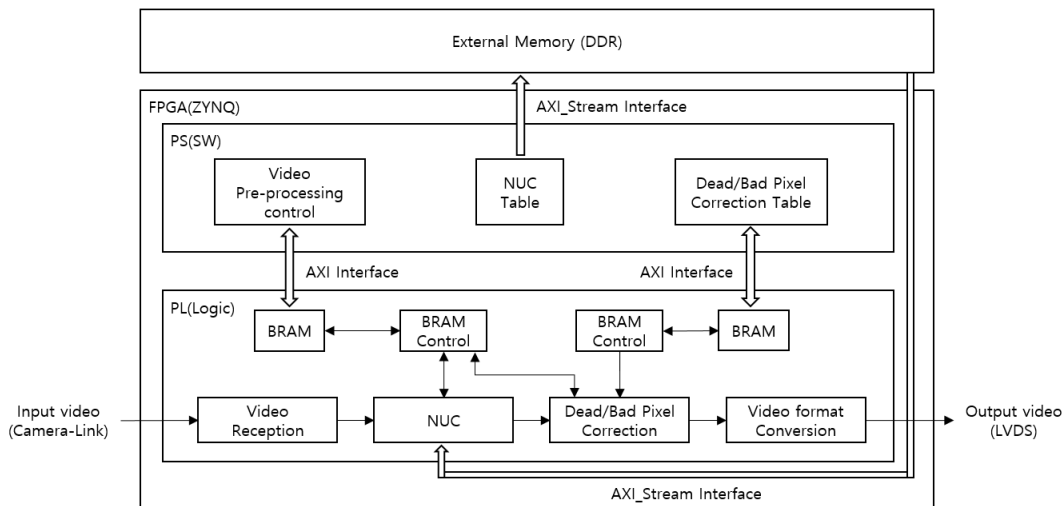


그림 4. 실시간 영상 전처리 블록도
Fig. 4. Block diagram of real-time video pre-processing

른 제품으로 변경될 때마다 보드를 제작해야되는 번거로움과 기능 구현에 다소 시간이 필요하다. 그러나, 본 논문에서 제시한 FPGA 설계는 공용화된 인터페이스 및 자체 인터페이스를 가지는 검출기에도 적용이 가능하며, 인터페이스 호환성 측면에서 우수한 강점이 있다.

1. 2-point NUC 방법을 이용한 불균일보정 방법

2-point NUC 방법은 두 개의 기준 온도인 저온과 고온의 픽셀 밝기 값을 이용하여 각 픽셀에 대한 이득과 오프셋 보정 값을 구할 수 있다. 각 픽셀마다 보정 값을 이용하여 불균일 보정을 계산한 후 불균일보정 테이블에 미리 맵핑함으로써 실시간 영상 이미지 처리가 가능하다.

그림 5는 2-point NUC의 개념을 나타내며, 저온 T_{Low} 에서 고온 T_{High} 까지의 k 와 l 번째의 픽셀 $p_{(k,l)}$ 별 밝기 값은 선형(linear)하다고 가정한다. 특정 온도 T 에 대한 픽셀 밝기 값에 따라 선형 방정식을 활용하여 픽셀 별 k 와 l 번째의 이득 $G_{(k,l)}$ 과 k 와 l 번째의 오프셋 $O_{(k,l)}$ 의 보정 값을 구할 수 있다. 본 논문에서 기준이 되는 저온과 고온에 대한 픽셀 밝기 값은 정확한 픽셀 별 k 와 l 번째의 이득 $G_{(k,l)}$ 과 k 와 l 번째의 오프셋 $O_{(k,l)}$ 값을 획득하기

위해 적외선 영상 이미지의 누적 평균 프레임에 대한 픽셀 별 밝기 값을 평균한 값으로 계산하며, 각각 $\bar{p}_{avr}(T_{Low})$ 와 $\bar{p}_{avr}(T_{High})$ 로 나타낸다. 특정 온도 T 에 대한 최종 픽셀 별 밝기 값 $y_{(k,l)}(T)$ 은 특정 온도 T 에 대한 k 와 l 번째의 픽셀 $p_{(k,l)}(T)$ 에 해당되는 k 와 l 번째의 이득 $G_{(k,l)}$ 과 k 와 l 번째의 오프셋 $O_{(k,l)}$ 값을 이용하여 수식 1과 같이 계산한다.

$$y_{(k,l)}(T) = G_{(k,l)} \cdot p_{(k,l)}(T) + O_{(k,l)} \quad (1)$$

여기서, 픽셀 별 k 와 l 번째의 이득 $G_{(k,l)}$ 과 k 와 l 번째의 오프셋 $O_{(k,l)}$ 의 보정 값으로 계산된 특정 온도 T 에 대한 최종 픽셀 별 밝기 값 $y_{(k,l)}(T)$ 은 적외선 영상 이미지의 누적 평균 프레임에 대한 픽셀 별 밝기 값을 평균한 값과 동일하여, 수식 2와 같이 표현할 수 있다.

$$y_{(k,l)}(T) = \bar{p}_{avr}(T) \quad (2)$$

픽셀 별 k 와 l 번째의 이득 $G_{(k,l)}$ 과 픽셀 별 k 와 l 번째의 오프셋 $O_{(k,l)}$ 값을 각각 수식 3과 수식 4로 나타낸다.

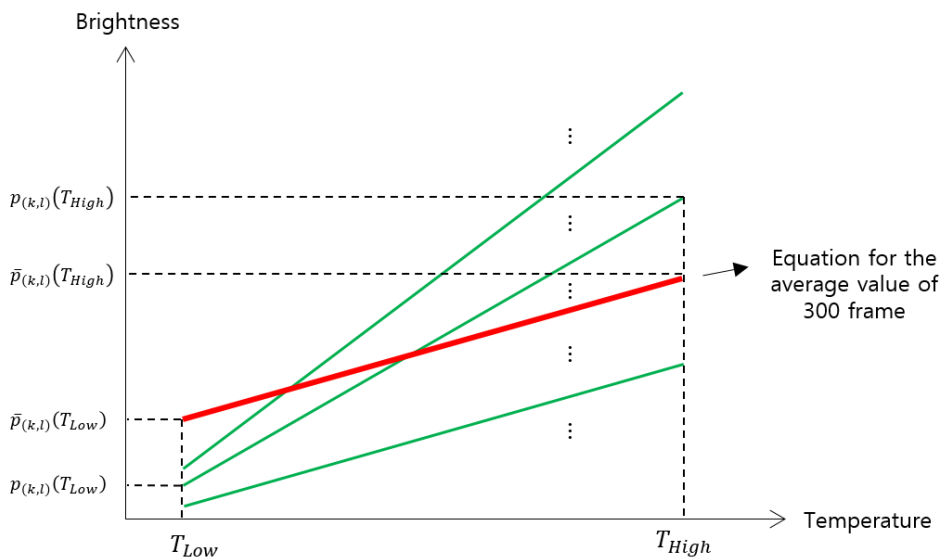


그림 5. 2-point NUC의 개념
 Fig. 5. Concept of 2-point NUC

수식 3에서는 저온 T_{Low} 와 고온 T_{High} 에서 k 와 l 번째의 픽셀 $p_{(k,l)}$ 별 밝기 값의 차이 대비 저온 T_{Low} 과 고온 T_{High} 에 대한 적외선 영상 이미지의 누적 평균 프레임에 대한 픽셀 별 밝기 값을 평균한 $\bar{p}_{avr}(T_{Low})$ 와 $\bar{p}_{avr}(T_{High})$ 의 차이의 비율을 이용하여 계산한다. 수식 4는 저온 T_{Low} 또는 고온 T_{High} 기준 적외선 영상 이미지의 누적 평균 프레임에 대한 픽셀 별 밝기 값을 평균한 $\bar{p}_{avr}(T_{Low})$ 또는 $\bar{p}_{avr}(T_{High})$ 에서 k 와 l 번째의 픽셀 $p_{(k,l)}$ 별 밝기 값에 수식 3에서 도출한 k 와 l 번째의 이득 $G_{(k,l)}$ 값을 곱한 결과 값을 뺀 값으로 계산한다.

$$G_{(k,l)} = \frac{\bar{p}_{avr}(T_{Low}) - \bar{p}_{avr}(T_{High})}{p_{(k,l)}(T_{Low}) - p_{(k,l)}(T_{High})} \quad (3)$$

$$O_{(k,l)} = \bar{p}_{avr}(T) - G_{(k,l)} \cdot p_{(k,l)}(T) \quad (4)$$

$T = T_{Low} \text{ or } T_{High}$

2. 불량픽셀보정 방법

불균일보정을 수행한 적외선 영상 이미지는 특정 부분 픽셀이 비정상적인 응답 특성을 갖는 불량픽셀이 존재하여, 영상 이미지의 품질을 저하시킨다. 불량픽셀은 그림 6과 같이 (x, y) 좌표에 대한 표준편차 σ 값이 시간 잡음의 2배보다 큰 값으로 출력되는 픽셀을 데드 픽셀과 베드 픽셀로 선정한다. 선정된 불량픽셀은 불량픽셀보정 방법으로 영상 이미지의 품질을 개선시킬 수 있다.

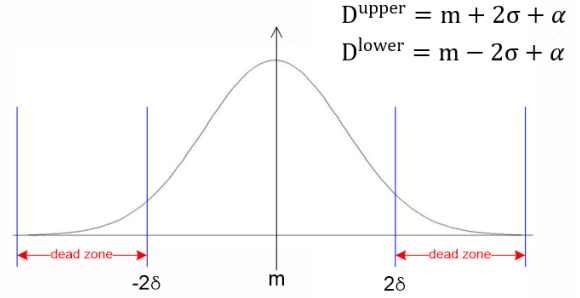


그림 6. 데드 픽셀과 베드 픽셀의 선정 조건
Fig. 6. Conditions selecting of dead pixel and bad pixel

불량픽셀보정은 적외선 영상 이미지에서 선정한 불량픽셀에 대해 가까운 인접 픽셀 값으로 대체하는 방법과 주변 픽셀 값들의 평균 값으로 대체하는 방법이 있다. 본 논문에서는 주변 픽셀 값들의 평균 값으로 대체하는 방법을 사용하였으며, 수식 5와 같다.

본 논문에서 적외선 영상 이미지의 사이즈는 640×512 로 가정하였으며, i 와 j 는 각각 640과 512를 의미한다. 여기서, (x, y) 좌표의 특정 픽셀 $p_{(x,y)}$ 은 조건식 k_1, k_2 와 l_1, l_2 에 따라 주변 픽셀의 개수가 정해진다. 특정 픽셀 기준에서 k_1 은 왼 방향의 픽셀을 의미하고 k_2 는 오른 방향의 픽셀을 나타내며, l_1 과 l_2 는 특정 픽셀 기준에서 각각 위 방향과 아래 방향의 픽셀을 의미한다. 여기서, (x, y) 좌표의 특정 픽셀 $p_{(x,y)}$ 의 왼 방향 k_1 과 오른 방향 k_2 , 위 방향 l_1 , 아래 방향 l_2 는 조건식에 따라 각각 m_1, m_2, m_3, m_4 의 값을 도출할 수 있다. 계산된 결과 값 $\hat{p}_{(x,y)}$ 은 최종 불량픽셀을 보정한 값을 의미하며, (x, y) 좌표의 특정 픽셀 $p_{(x,y)}$ 에 대해 주변 픽셀 값들의 평균 값으로 나타낸다.

$$\hat{p}_{(x,y)} = \frac{m_1 \cdot p_{(k_1=x-1,y)} + m_2 \cdot p_{(k_2=x+1,y)} + m_3 \cdot p_{(x,l_1=y-1)} + m_4 \cdot p_{(x,l_2=y+1)}}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \quad (5)$$

if $0 < k_1 < i$, then $m_1 = 1$, else $m_1 = 0$
 if $0 < k_2 < i$, then $m_2 = 1$, else $m_2 = 0$
 if $0 < l_1 < j$, then $m_3 = 1$, else $m_3 = 0$
 if $0 < l_2 < j$, then $m_4 = 1$, else $m_4 = 0$

IV. 실험 결과

적외선 영상 기반의 실시간 영상처리시스템을 위해 SW 순차 다이어그램에 따라 사용자가 순차적으로 체계에 불균일보정과 불량픽셀보정 명령을 송신한다. 체계에서는 사용자로부터 전달 받은 명령을 부체계에 전달하며, 부체계에서는 불균일보정과 불량픽셀보정의 명령을 수신하여 적외선 영상 이미지에 불균일보정과 불량픽셀보정을 수행한다. 실험은 세 가지 경우로 나뉘 비교하며, 영상 원본과 불균일보정을 수행한 영상을 비교한다. 다음으로, 영상 원본과 불균일보정과 불량픽셀보정을 적용한 영상을 비교하는 실험을 제시한다. 마지막으로, 불균일보정을 수행한 영상과 불

균일보정과 불량픽셀보정을 적용한 영상을 비교한다. 실험은 USAF 분해능 테스트 차트 (USAF resolution test chart)를 이용하여 표적 식별 가능 여부, 표적의 분해능에 대해 비교하고 평가한다. 이 때, 표적 식별은 육안으로 표적 식별 여부를 판단하고, 본 논문에서의 광학 성능은 완벽하다고 가정하고 실험을 수행하였다.

그림 7은 적외선 검출기에서 출력한 적외선 영상이 실험 참가자의 손을 식별하여, 순차적으로 원 영상과 2-point NUC 방법으로 불균일보정을 수행한 적외선 영상 및 불균일보정과 주변 픽셀 값들의 평균 값으로 대체한 불량픽셀보정을 적용한 적외선 영상을 나타낸다. 그림 7(a)의 원 영상 대비 그림 7(b)에서 영상 품질이 향상되었음을 확인할

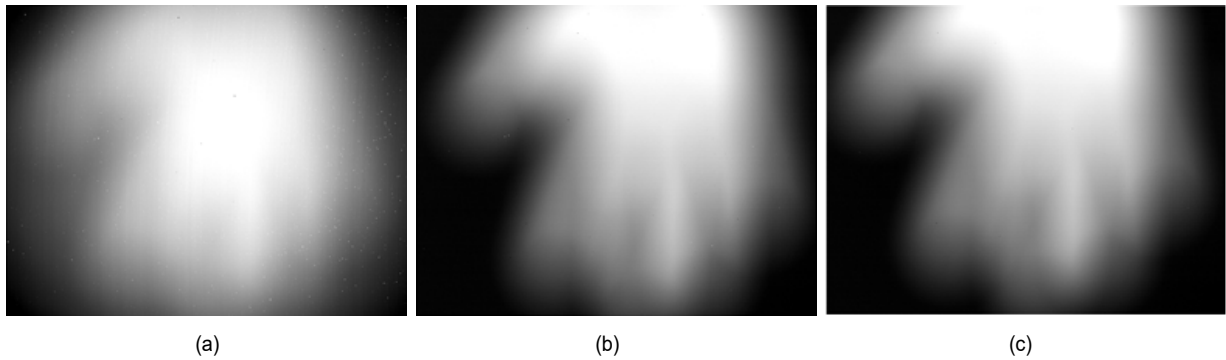


그림 7. 실험 참가자의 손을 식별한 적외선 영상, (a) 적외선 원 영상, (b) 불균일보정을 수행한 적외선 영상, (c) 불균일보정과 불량픽셀보정을 수행한 적외선 영상

Fig. 7. Infrared image that identified the experiment participants hand, (a) Infrared original image, (b) Infrared image performed with non-uniformity correction, (c) Infrared image performed with non-uniformity correction and defective pixel correction image performed with non-uniformity correction and defective pixel correction

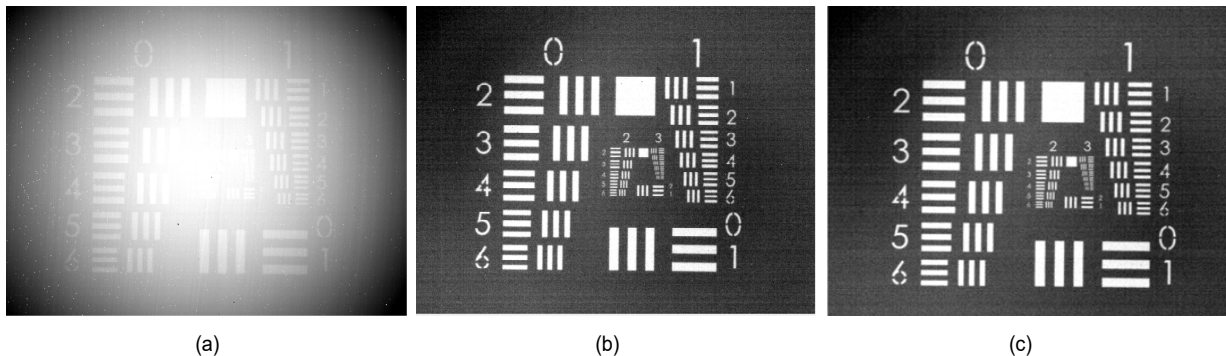


그림 8. USAF를 이용한 적외선 영상 표적 식별, (a) 적외선 원 영상, (b) 불균일보정을 수행한 적외선 영상, (c) 불균일보정과 불량픽셀보정을 수행한 적외선 영상

Fig. 8. Target identification of infrared images using USAF, (a) Infrared original image, (b) Infrared image performed with non-uniformity correction, (c) Infrared image performed with non-uniformity correction and defective pixel correction

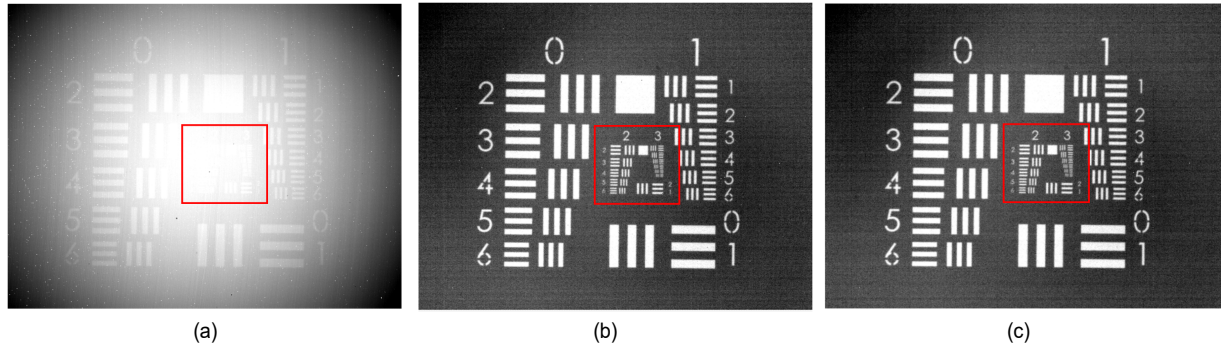


그림 9. USAF를 이용한 적외선 영상의 분해능, (a) 적외선 원 영상, (b) 불균일보정을 수행한 적외선 영상, (c) 불균일보정과 불량픽셀보정을 수행한 적외선 영상

Fig. 9. Resolution of infrared images using USAF, (a) Infrared original image, (b) Infrared image performed with non-uniformity correction, (c) Infrared image performed with non-uniformity correction and defective pixel correction

수 있으나, 불균일보정을 수행한 적외선 영상에서는 잔여 불량픽셀이 존재하여 영상 품질 저하를 초래한다. 불균일보정과 불량픽셀보정을 적용한 그림 7(c)는 불량픽셀보정을 수행하지 않은 그림 7(b) 대비 영상 품질이 개선되었음을 확인할 수 있다.

그림 8은 USAF를 이용하여 표적을 식별한 적외선 원 영상, 불균일보정을 수행한 적외선 영상 및 불균일보정과 불량픽셀보정을 수행한 적외선 영상을 나타낸다. 이 때, USAF를 이용하여 표적 식별이 육안으로 식별이 가능하지 않은 적외선 원 영상 그림 8(a)에 비해 불균일보정을 수행한 적외선 영상 그림 8(b)는 육안으로 식별이 가능함을 확인할 수 있다. 불균일보정과 불량픽셀보정을 수행한 적외선 영상 그림 8(c)는 불균일보정을 수행한 적외선 영상 그림 8(b)처럼 육안으로 표적 식별이 가능하지만, 불균일보정을 수행하고 남은 잔여 불량픽셀을 보정함으로써 개선된 적외선 영상을 획득할 수 있다.

그림 9는 USAF를 이용하여 표적을 식별한 그림 9(a)의 적외선 원 영상, 그림 9(b)의 불균일보정을 수행한 적외선 영상 및 그림 9(c)의 불균일보정과 불량픽셀보정을 수행한 적외선 영상의 분해능 정도를 나타낸다. 그림 9(a)와 그림 9(b)의 분해능은 각각 2군 1매, 3군 4매로 나타나며, 그림 9(a)의 분해능 대비 그림 9(b)의 분해능 정도가 향상되었음을 확인할 수 있다. 그림 9(b)와 그림 9(c)의 분해능은 3군 4매로 동일하지만, 그림 9(c)에서 보여지듯이 그림 9(b)의 표적에서 식별되

는 잔여 불량픽셀이 보정된 표적을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 적외선 영상 기반의 실시간 영상처리시스템을 위한 HW 및 SW 개발과 FPGA 설계 방법을 제시하였고, 실시간 영상 전처리를 위한 블록에 대해 기술하였다. 또한, 원 영상과 개선된 적외선 영상을 USAF 분해능 테스트 차트를 통해 표적 식별 여부와 분해능에 대해 비교하고 평가하였다. 적외선 검출기에서 출력되는 적외선 영상은 전처리 제어 단계에서 2-point NUC를 이용한 불균일보정을 제시하였으며, 기존 원 영상 대비 영상 품질이 향상되었음을 확인할 수 있다. 특정 픽셀에서 비정상적인 응답 특성을 갖는 불량픽셀을 주변 픽셀들의 밝기 값을 평균값으로 대체하는 불량픽셀보정 방법을 제시하고, 불량픽셀보정이 적용되지 않은 영상 대비 불량픽셀보정을 적용한 영상이 개선되었음을 알 수 있다. 본 논문에서의 실험 결과는 불균일보정을 수행한 영상이 적외선 원 영상보다 영상 품질이 향상됨을 확인할 수 있고, 불균일보정을 수행한 영상은 3군 4매로 적외선 원 영상 2군 1매보다 분해능이 향상되었다. 또한, 불균일보정과 불량픽셀보정을 적용한 적외선 영상은 불균일보정만 적용한 적외선 영상보다 개선된 영상으로 표적을 식별할 수 있음을 보여준다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] D. A. Scribner, M. Krueger and J. Killiany, "Infrared focal plane array technology", *Proc. IEEE.*, Vol. 79, No. 1, pp. 66 - 85, Jan 1991.
doi: <https://doi.org/10.1109/5.64383>
- [2] M.Z Tidrow, W.R Dyer, "Infrared sensors for ballistic missile defense", *Infrared Physics & Technology*, Vol. 42, Issues 3-5, pp. 333-336, June 2001.
doi: [https://doi.org/10.1016/S1350-4495\(01\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S1350-4495(01)00092-5)
- [3] A. Rogalski, "Infrared detectors: status and trends", *Progress in Quantum Electronics*, Vol. 27, Issues 2-3, pp. 59-210, 2003.
doi: [https://doi.org/10.1016/S0079-6727\(02\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6727(02)00024-1)
- [4] A. Rogalski, "Infrared detectors: an overview", *Infrared Physics & Technology*, Vol. 43, pp. 187-210, 2002.
doi: [https://doi.org/10.1016/S1350-4495\(02\)00140-8](https://doi.org/10.1016/S1350-4495(02)00140-8)
- [5] Jonathan M Mooney, Freeman D Sheppard, William S. Ewing, James E Ewing and Jerry Silverman, "Responsivity Nonuniformity Limited Performance Of Infrared Staring Cameras", *Optical Engineering.*, Vol. 28, No. 11, pp. 1151-1161, Nov 1989.
doi: <https://doi.org/10.1117/12.7977112>
- [6] F. Marcotte, P. Tremblay, V. Farley, "Infrared camera NUC and Calibration: comparison of advanced methods", *Proc. SPIE*, 870603, June 2013.
doi: <https://doi.org/10.1117/12.2016265>
- [7] Max J. Schulz and Larry V. Caldwell, "Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane arrays", *Infrared Physics & Technology.*, Vol. 36, No. 4, pp. 763-777, Jun 1995.
doi: [https://doi.org/10.1016/1350-4495\(94\)00002-3](https://doi.org/10.1016/1350-4495(94)00002-3)
- [8] W. Isoz, T. Svensson and I. Renhorn, "Nonuniformity correction of infrared focal plane arrays", *Proc. SPIE.*, Vol. 5783, pp. 949-960, May 2005.
doi: <https://doi.org/10.1117/12.606691>
- [9] David L. Perry and Eustace L. Dereniak, "Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors", *Optical Engineering.*, Vol. 32, No. 8, 1854-1859, Oct 1993.
doi: <https://doi.org/10.1117/12.145601>
- [10] M. Broekaert and B. N. Payrat, "Nonlinearity and nonuniformity corrections for the IRIS family of IRCCD thermal imagers", *Proc. SPIE*, 2269, pp. 507-523, 1994.
doi: <https://doi.org/10.1117/12.188665>

저 자 소 개

안 해 성



- 2020년 2월 : 한국해양대학교 전자전기정보공학부 (공학사)
- 2022년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학 (공학석사)
- 2022년 4월 ~ 현재 : LIG 넥스원 선임연구원
- ORCID : <http://orcid.org/0000-0002-2520-5649>
- 주관심분야 : EO/IR, FPGA, AI, 디지털영상처리, 디지털통신시스템

김 상 우



- 2022년 2월 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전자공학전공 (공학사)
- 2022년 4월 ~ 현재 : LIG 넥스원 선임연구원
- ORCID : <http://orcid.org/0009-0000-4121-9728>
- 주관심분야 : EO/IR, FPGA, 디지털영상처리

서 성 교



- 2010년 2월 : 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
- 2010년 1월 ~ 2013년 1월 : LG디스플레이 연구원
- 2013년 1월 ~ 현재 : LIG 넥스원 선임연구원
- 2022년 2월 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학 (공학석사)
- ORCID : <http://orcid.org/0009-0008-2371-5814>
- 주관심분야 : EO/IR, FPGA, AI, 디지털영상처리

저 자 소 개

손 원 규



- 2022년 2월 : 세종대학교 전자정보통신공학과 (공학사)
- 2022년 1월 ~ 2023년 1월 : 티에스이 연구원
- 2023년 2월 ~ 현재 : LIG 넥스원 연구원
- ORCID : <http://orcid.org/0009-0004-3757-0573>
- 주관심분야 : EO/IR, FPGA, RF회로, 디지털영상처리

오 민 택



- 2007년 8월 : 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부 (공학사)
- 2009년 8월 : 서울과학기술대학교 메카트로닉스학과 (공학석사)
- 2013년 5월 ~ 현재 : LIG 넥스원 수석연구원
- ORCID : <http://orcid.org/0009-0001-2569-9028>
- 주관심분야 : EO/IR, 기계제어

박 승 욱



- 2007년 2월 : 고려대학교 전기전자전파공학과 (공학사)
- 2007년 1월 ~ 현재 : LIG 넥스원 수석연구원
- ORCID : <http://orcid.org/0009-0009-8817-7284>
- 주관심분야 : EO/IR, 감시정찰체계, 대구경 망원경