

초점면 배열 방식 열상 카메라 시스템의 화질 개선 연구

박 세 화*

A Study on the Improvement of Image Quality for a Thermal Imaging System with Focal Plane Array Typed Sensor

Se-Hwa Park*

요약 대상 물체의 온도분포를 해석하고 계속하기 위해 열상 장비가 구현된다. 시스템의 주요한 부분은 초점면 배열 형태의 센서가 적용된 열상 카메라이다. 적용된 열상 센서는 중파장 적외선 영역의 신호를 검출하며 열상을 형성하기 위한 기본 신호를 출력한다. DSP가 활용되어 센서 신호처리를 통해 열상을 구성하고 NTSC 신호 및 디지털 신호 출력을 한다. 열상의 화질을 개선하기 위해 이점 교정법을 적용한다. 이는 낮은 온도와 높은 온도를 기준으로 하여 초점면 배열 센서 화소 신호의 공간적인 비균일함을 교정하는 것으로서 실험 결과를 통해 열상의 화질이 개선됨을 보인다.

Abstract Thermal imaging system is implemented for the measurement and the analysis of the thermal distribution of the target objects. The main part of the system is thermal camera in which a focal plane array typed sensor is introduced. The sensor detects mid-range infrared spectrum of target objects and then it outputs generic video signal which should be processed to form a thermal image frame. A digital signal processor(DSP) in the system inputs analog to digital converted data, performs algorithms to improve the thermal images and then outputs the corrected frame data to frame buffers for NTSC encoding and for digital outputs. To enhance the quality of the thermal images, two point correction method is applied. Figures indicate that the corrected thermal images are much improved.

Key Words : Thermal imaging, Digital signal processor, Two point correction, Focal plane array, Infrared sensor

1. 서 론

모든 생물이든 무생물이든 절대온도 0도 이상에서는 복사에너지를 방출하고 있으며, 이 에너지는 공기, 가스, 액체, 고체 등의 물리적 전달체를 통하여 전파된다. 따라서, 외부 광원이 전혀 없는 야간에도 물체 자체가 발하는 복사에너지를 측정할 수 있으면, 그 물체의 모양이나 움직임을 손쉽게 파악할 수 있다. 이렇게 물체에서 내는 복사에너지는 가시광선의 스펙트럼 영역과는 거의 독립적인 적외선 영역에 존재함으로써 사람의 눈에는 보이지 않으며, 온도의 차이로 인해 주변과 구별이 된다. 이와 같이 적외선 영역에 속함으로써 사람의 눈으로 볼 수 없는 물체의 온도분포를 적절한 변환을 통해 가시화 하여 쉽게 인식할 수 있도록 만들어 주는 장비를 보

통 넓은 의미에서 열상 장비(Thermal Imaging System) 또는 열상 카메라 시스템이라고 한다[1,2]. 이러한 열상 장비의 기본 구성을 위해서는 적외선 렌즈로 구성된 광학부, 적외선 검출기, 검출기에서 발생된 신호를 영상 신호에 적합하도록 처리하는 휘독(readout) 회로, 센서 처리부 및 영상 가시화부 등으로 이루어진다.

과거에는 한 점에 대한 온도 특성을 측정할 수 있는 적외선 센서와 액체 냉각 방식의 냉각기 및 복잡한 광학계로 이루어진 구조의 열상 장비가 주로 개발되어왔다. 최근에는 1차원의 적외선 센서 또는 2차원의 초점면 배열(Focal Plane Array) 센서가 채택 적용되고 있다[3-6]. 초점면 배열 방식의 센서는 프레임의 해상도가 고정되어 있으며, 각 화소(pixel)가 2차원 배열로 결정된 위치를 가지고 있다. 각 화소가 외부로 신호를 출력할 때에는 각각에서 모아진 복사에너지를 휘독(readout)회로에서 전기신호로 변환, 증폭하여 출력시킴으로써 영상신

*한국생산기술연구원 의료반도체기술연구팀

본 논문은 한국생산기술연구원과 (주)위너텍이 공동 지원하는 1999년도 생산기술연구개발사업으로서 개발한 것이며, 그 핵심 내용은 열상 카메라 시스템의 구현 사례와 열상의 화질 개선 방법에 관한 것이다. 이는 온도 분포 계측 기기인 열상 장비의 성능을 개선하는 신제품 개발 기술이다. (Tel: 041-589-8467)

호를 발생시켜준다. 이 때, 광학부에 적외선 렌즈를 부착하고, 센서 유닛과 접속하여 비디오 신호를 입력받아 처리하면 열상 프레임을 구성할 수 있어서 열상 시스템의 구조가 아주 단순해질 수 있다. 하지만, 모든 화소의 특성이 조금씩 차이가 있어서 동일한 물체에 대해서도 비균일한(nonuniform) 특성이 있다. 따라서, 이를 직접 처리해 주는 비균일성 보상이 반드시 필요하다. [6]에 열상시스템의 구현 경험을 보고하고 있지만, [6]에서는 비균일성 보상 방법에 대한 처리가 이루어지고 있지 않아서 본 논문에서 그 과정을 기술하고 실험 결과를 실는다.

2. 열상 구성의 기본 원리

모든 물체는 절대 온도 0도 이상에서 전자기 에너지를 복사(radiation)를 한다. 이런 단위 파장당 복사의 최대값은 식(1)의 플랑크(Planck)의 흑체 복사 법칙(Blackbody Radiation Law)으로 주어진다.

$$M_e(\lambda, T) = \left(\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \right) \left[\exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1} \quad [Wm^{-2}] \quad (1)$$

여기서,

- c : 빛의 속도
- h : Planck 상수 = 6.626×10^{-34} J s
- k : Boltzmann 상수 = 1.381×10^{-23} J K⁻¹
- T : 절대온도(Kelvin)
- λ : Radiation wavelength in meter.

참고를 위해 파장과 복사에너지의 관계를 Figure 1에 나타내었다. 실제 물체의 복사는 흑체 복사 항에 스펙트럼 복사율(emissivity) $\epsilon(\lambda)$ 를 곱해야 한다.

양자(Photon)당 에너지는 $\frac{hc}{\lambda}$ 이므로, 양자 플럭스(Photon flux)에 의해 플랑크의 법칙은 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$M_e(\lambda, T) = \left(\frac{\lambda}{hc} \right) M_e(\lambda, T) \text{ [photons/s/m}^2] \quad (2)$$

복사되는 전체의 파워는 식(1)을 모든 파장에 대해 적분함으로써 주어지며 이는 식(3)과 같이 나타내진다.

$$M_e(T) = \sigma T^4 \text{ [Wm}^{-2}] \quad (3)$$

여기서 σ 는 볼츠만(Boltzman) 상수(5.67×10^{-8} W m⁻² K⁻⁴)이다. 300 K에서 1 m²의 면적을 가진 흑체가 내는

전체의 파워는 약 460 W이며, 이런 물체의 온도에 대한 변화율은

$$\frac{\delta M_e}{\delta T} = 4\sigma T^3 \quad (4)$$

이다. 이는 300 K에서 약 6 W m⁻² K⁻¹에 해당된다. 보통의 물체로부터 나오는 복사에너지를 계측하는 경우 각 화소마다 온도와 복사율의 변동에 의해 열상과 관련된 신호가 변화됨을 알 수 있다. 따라서 열상을 구성하는 경우에 유용한 신호는 이런 복사에너지의 변화이다. 그러므로, 열상의 기본 원리는 복사에너지의 변동을 검출하여 적외선 화면(scene)의 실제 영상을 구현하는 것이다.

3. 초점면 배열 열상 센서의 비균일성 보상 방법

식(4)에서 언급된 바와 같이 복사에너지의 변동을 검출하여 열상 신호를 형성하게 되는데, Mooney[7]는 적외선 센서의 선형 모델을 개발하였다. Mooney의 선형 모델은 초점면 배열 센서가 스펙트럼이 비균일하고, 더해지거나 곱해지는 형태의 광 응답성을 가진다고 보았다. Perry[8]는 Mooney의 센서 모델을 바탕으로 하여 PtSi 초점면 배열 센서의 비균일성 교정에 대한 분석을 하기도 했는데, 그가 적용한 방법은 일반적인 초점면 배열 센서에도 동일하게 응용 가능하여 본 연구에서도 활용해 보았다.

초점면 배열 센서의 비균일성을 개선하기 위한 간단한 방법으로는 일점 교정법(one point correction)이 있으며, 이는 특정온도를 기준으로 하여 비균일성을 교정하게 된다. 일점 교정법은 특정온도에서는 균일하게 교정이 되지만 그 온도차이가 커질수록 균일성이 약화된다.

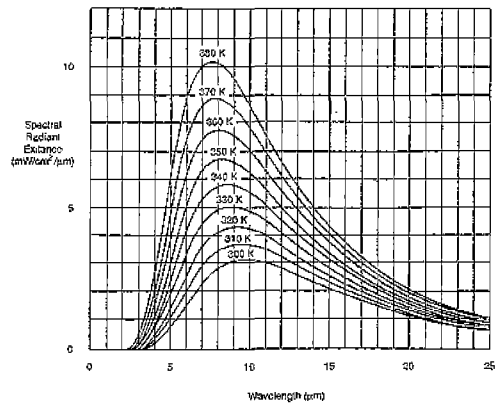


Figure 1. 파장과 복사에너지와의 관계.

일점 교정만으로도 화질을 많이 개선할 수 있지만, 낮은 온도와 높은 온도를 기준으로 하여 그 두 온도에서는 균일함을 유지하고 그 밖의 온도에 대해서는 선형 보간을 하는 형태인 이점 교정법(two point correction)을 적용하면 보다 더 개선이 가능하다.

따라서, 본 논문에서는 이점 보정으로 화질을 개선하고자 한다. 이점 교정을 위해 $N_{ij}(T_{ij})$ 를 화소 (i, j)에 대한 A/D(Analog to Digital) 변환된 수치값이라고 하자. 화소의 출력 값은 광학적인 파라미터들(F#, 광학부의 유효 전달율, cutoff wavelength 등)과 센서 자체의 특성과 관련되어 레벨이 정해지며, 그 레벨에 따라 A/D 변환되어 수치화될 수 있다. [6]에서 언급되어 있듯이 양자 축적시간의 조정이 센서 접속 시에 주요한 튜닝 파라미터로 활용되어 A/D 변환 수치의 크기를 결정하기도 한다.

$\widehat{N}_{ij}(T_s)$ 를 기준 일원에 대해 이점 교정법으로 보정된 수치값이라고 하면, 이는 다음 식에 의해 계산된다.

$$\widehat{N}_{ij}(T_s) = [N_{ij}(T_s) - N_{ij}(T_{cal1})]K_{ij} + \overline{N}_{ij}(T_{cal1}), \quad (5)$$

$$K_{ij} = \frac{\overline{N}_{ij}(T_{cal2}) - \overline{N}_{ij}(T_{cal1})}{N_{ij}(T_{cal2}) - N_{ij}(T_{cal1})}, \quad (6)$$

여기서,

- T_s : source temperature
- T_{cal1} : First calibration temperature
- T_{cal2} : Second calibration temperature
- $N_{ij}(T_s)$: T_s 에서의 수치값
- $N_{ij}(T_{cal1})$: T_{cal1} 에서의 수치값
- $N_{ij}(T_{cal2})$: T_{cal2} 에서의 수치값
- $\overline{N}_{ij}(T_{cal1})$: T_{cal1} 에서의 공간적인 수치

평균값. 즉, P는 수평화소수, Q는 수직화소수이면, 이는

$$\frac{1}{P \cdot Q} \sum_i^P \sum_j^Q N_{ij}(T_{cal1}).$$

$\widehat{N}_{ij}(T_s)$ 를 얻기 위해서는 먼저 낮은 온도(T_{cal1})와 높은 온도(T_{cal2})에 대해서 모든 화소의 수치화된 값을 저장하고, 각 온도에 대한 평균수치도 저장을 하고 있어야 한다. 그 다음 식(6)에 의해 모든 화소에 대한 곱셈 계수(K_{ij})를 구한 다음 저장해 놓고 식(5)에 의해 보정된 출력값을 얻게 된다.

4. 열상 시스템 구현

본 논문에서 구현한 열상 카메라 시스템을 위한 초점면 배열 형태의 열상 센서는 중파장 적외선(3 ~ 5 μm)의 스펙트럼에 해당되며, InSb 검출소자로 이루어진 256×256 의 화소를 가진 센서이다.

열상 센서와의 인터페이스를 위해서 아날로그와 디지털 회로가 복합된 전자 회로가 요구되며, 열상을 구성하기 위해 여러 단계의 처리 과정이 필요하다. 즉, 열상 센서와 접속하여 디지털로 데이터 변환하는 과정과 이런 데이터를 적절히 처리하여 열상 프레임의 구성 과정, 그리고 열상 프레임 데이터를 가시화 하여 보이기 위한 NTSC 인코더 및 외부 기기 출력하기 위한 버퍼에 보내는 과정으로 크게 구분된다. 여기서, 열상 프레임을 효과적으로 처리해야 깨끗한 열상 구성이 이루어질 수 있다. 열상 프레임 구성 시간을 줄이고 비균일한 데이터의 처리를 위해서 프로세서가 요구되는데, 최근 신호 처리 분야에 많이 적용되고 있는 DSP(Digital Signal Processor)를 채택 응용하였다. 본 연구에서는 이를 위해 TI사의 TMS320C31(50MHz)[9]이 활용되었는데, 이는 32비트 프로세서로써 자체에 부동소수점 연산기가 있어서 고속으로 실수 연산이 가능하다.

DSI에서 A/D 변환기를 통해 수치화된 데이터를 적절히 처리하여 열상 프레임을 구성하고 이를 NTSC 신호로 변환하는 기능도 요구되며, PC에서 열상 프레임 데이터를 입력받기 위한 인터페이스 기능도 일반적으로 필요하다. 이런 기능을 모두 갖추기 위해 Figure 2와 같은 요소들로 이루어져 열상 카메라가 구현된다[6]. 열상 센서의 적외선 검출기는 광전형(photon effects)이며, 검출기, 취득회로, 그리고 냉각기가 일체형으로 구성되어 있다. 이런 열상 센서는 A/D 변환(10MHz)과 신호 조절 기능을 갖춘 아날로그 신호 처리 보드에 접속되며, 이를 통해 수치화된 데이터는 디지털신호 처리 보드에서 DSP의 제어로 열상 프레임 데이터를 형성한다. 아날로그 신호 처리 보드는 센서와 직접 인터페이스되며, 센서에서 요구하는 여러 종류의 전원을 생성해 주기도 한다. 디지털 신호 처리 보드는 DSP, EPLD(erasable and programmable logic device), 32비트의 메모리(512K SRAM, 128K EEPROM, 512K Flash Memory, 256K Dual Port FIFO memory 2 pair), NTSC 인코더(KS0119) 및 디지털 I/O(input/output) 포트 등이 구현되어 있다. 여기서, 센서와의 통신을 위한 부분과 센서의 비디오 출력 시기 조절 기능을 EPLD에 하드웨어적으로 구현하였다. 시스템에서 출력하는 NTSC 신호는 일반 TV 모니터를 통해 가시화된 열상을 볼 수 있으며, 디지털 출력 신호는 PC

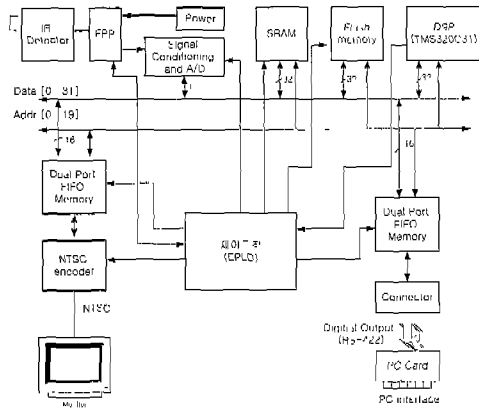


Figure 2. 전체 하드웨어의 주요 기능별 구성도.

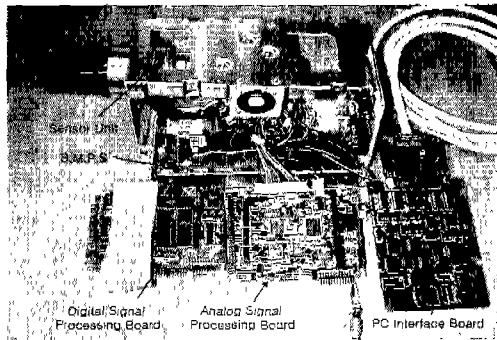


Figure 3. 구현된 열상 카메라 시스템.

에서 비스 인터페이스 카드를 통해 입력받을 수 있다. PC에서 열상 프레임 데이터를 입력받게 되면, 적절히 색깔을 입힌 후에 PC의 모니터에 생성시킬 수 있으며, 일반적인 여러 영상 처리 기법이 적용되어 분석 처리한 후에 인쇄할 수도 있다.

본 논문에서 구현한 열상 카메라 시스템의 하드웨어를 Figure 3에 나타내었다. 소형화된 외함에 넣기 위해 전원보드, 아날로그 신호처리 보드, 두 장의 디지털 신호처리 보드로 나누어 기능을 구현하였다. 그리고, PC의 ISA버스 접속 보드와 열상 카메라와는 68 신호선으로 연결된다. 열상 센서 전면부에는 적외선 렌즈가 장착되며, 센서와 적외선 렌즈를 제외한 나머지 부분은 모두 자체적으로 설계 및 제작하였다. 보다 자세한 구현내용은 참고문헌 [10]에 나타나 있다.

5. 실험 및 결과

적용된 A/D 변환기는 12비트로서, 0~5 V의 입력 전압 범위 내에서 0~4095까지의 변환된 수치를 얻을 수 있다. 광자 축적 시간의 조정에 따라 A/D 변환 신호의

레벨이 바뀌게 되므로, 반복 실험을 통해 상온에서 A/D 변환값이 2,000 근방이 되도록 5 msec로 고정한다. 그리고, 이점 보정을 위해 설정된 온도를 균일하게 유지하는 기기(Black body Infrared source)를 이용한다. 보유한 기기의 조절 가능한 온도(5.0°C~50°C)와 A/D 변환된 수치와의 과잉(overflow)이 생기지 않는 범위에서 낮은 온도는 5.0°C를 높은 온도는 45.0°C를 기준으로 하여 비균일성 보상을 수행하였다. 여기서, 센서의 열상의 해상도는 256×256 이다.

이점 보정을 DSP가 처리하는 과정은 먼저 낮은 온도에 대한 모든 화소 신호의 A/D 변환 수치를 수차례 반복 실험으로 취득한 후 이를 플래쉬 메모리에 저장한다. 나중에 플래쉬 메모리에 저장된 여러 열상 프레임 데이터에서 매 화소의 평균값은 구하고($N_{ij}(T_{cal})$ 계산), 실제 화소에 대한 평균값, $\overline{N}_i(T_{cal})$ 을 구한 다음 이들 모두를 플래쉬 메모리에 역시 저장한다. 높은 온도에 대해서도 전술한 실험을 통해 $N_{ij}(T_{cal})$ 을 얻는다. 그 다음 식(6)에 의해 모든 화소에 대한 보정 계수 K_{ij} 을 구하여 플래쉬 메모리에 저장한다. 이와 같은 과정을 통해 얻어진 저장된 데이터 중 K_{ij} , $N_{ij}(T_{cal})$ 그리고 $\overline{N}_i(T_{cal})$ 이렇게 2N(N은 총화소수) + 1개의 데이터만 플래쉬 메모리에 남기고 다른 데이터는 지운 다음, 보정 열상 프레임 데이터를 형성시에는 식(5)를 모든 화소에 적용한다.

구현한 열상 카메라 시스템에서 보정 성능을 보기 위해 손쉽게 얻을 수 있는 인체의 열상을 대상으로 손과 안면에 대해 실험한 결과를 Figure 4와 Figure 5에 나타내었다. 각각의 Figure에서 보정을 안하고 A/D 변환된 원래의 데이터로 열상을 구성하였을 시와 이점 보정과 불량 화소(bad pixel) 교정을 하여 화질을 개선한 경우에 대해 비교해 볼 수 있다. Figure 4(a)와 Figure 5(a)에서 보여주듯이, 보정 처리가 안 된 원래의 열상은 센서 제조 공정의 단순화를 위해 8개의 영역으로 나뉘어 분할되고 또한 90도 회전되어 형성된다. 이런 열상은 제대로 된 형태가 아니므로, DSP에서 이를 적절히 처리하여 프



(a) 보정 처리 안된 원래의 열상 (b) 화질 개선된 열상

Figure 4. 열상의 비교 (1).

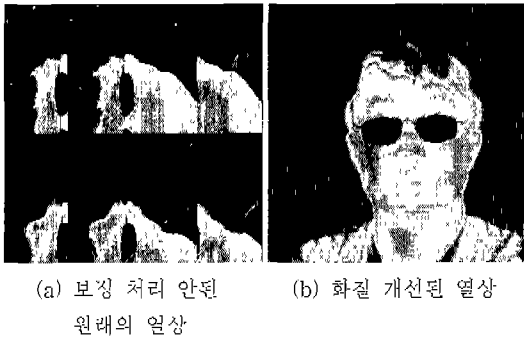


Figure 5. 열상의 비교 (2).

레이름 구성한 다음 이점 교정법을 적용하여 Figure 4(b)와 Figure 5(b)와 같은 화질이 개선된 결과를 얻었다. 이 때, 이점 보정을 하지 않을 때는 1초에 최대 11프레임의 열상을 출력하는 것이 가능했지만, 이점 보정 시에는 많은 연산 시간이 요구되어 초당 5프레임의 열상을 생성시킬 수 있었다.

6. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 초점면 배열의 열상 센서를 적용하여 열상 장비의 구현 내용과 이점 교정법을 이용하여 열상의 화질을 개선한 실험 결과를 다루었다. 이점 교정을 적용하면 센서의 불균일함을 상당히 개선할 수 있다고 알려져 있는데, 실험 결과를 통해서 이를 확인할 수 있었다.

구현한 열상 시스템이 완전히 안정화가 안된 관계로 열상의 획득이 안정적이지 못하여 해석적으로 열상에서 개선된 정도를 분석한 결과물 신지는 못한 점은 아쉬움으로 남기니, 실험 결과물 보완하고 해석적으로 개선 정도를 비교한 결과는 추후 연구과제로 남기고자 한다. 이점 교정법을 기본으로 하여 주어진 온도 영역에 대해 여러 구간으로 나누어 교정하는 다점 교정법을 적용할 수도 있겠으며, 이와 같은 방법의 적용으로 열상의 화질을 개선한다면 의료용 체열 진단이나 진찰의 단열 분석 등 많은 열상 장비 응용 분야에서 아주 정밀한 계측이 가능하게 되리라 보아진다.

열상 장비 관련하여서는 응용 분야가 현재까지는 주로 국방과 관련되어 있으므로, 외국의 경우에도 관련된 기술적인 성과의 노출을 극히 제한하고 있어서 공개된

자료의 빈곤으로 실제 구현 시에 어려움이 많이 있었다. 부족하기는 하지만 본 연구에서 다룬 열상의 화질 개선 방법은 이 분야에 조금이나마 기여를 하리라고 기대한다.

7. 후 기

본 논문은 한국생산기술연구원의 생산기술연구개발 사업 연구과제(열상 센서의 신호 처리 기술 개발) 연구 결과의 일부를 수록한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] 홍석민, 송인섭, "열상장비 개요", 물리학과 첨단기술, pp. 2-8, 3월, 1998.
- [2] George J. Zisis, "Sources of Radiation", The Infrared & Electro Optical Systems Handbook, Vol. 1, SPIE Press, 1993.
- [3] 국방과학연구소, "초점면 배열 적외선 장비의 이해", 국방기술 정보, 1월, 1999.
- [4] P. Helander, *et al.*, "A 320×240 Pixels Quantum Well Infrared Photodetector Array for Thermal Imaging", Physica Scripta, Vol. T79, pp. 138-142, 1999.
- [5] 박세화, 원동혁, "열상 센서 신호 처리를 위한 DSP의 응용", 한국자동제어학회지, pp. 1607-1609, 10월, 1998.
- [6] 박세화, 원동혁, 오세중, 윤대섭, "초점면 배열 방식의 열상카메라 시스템의 구현", 제어·자동화·시스템공학회논문지, Vol. 6, No. 4, pp. 397-404, 2000.
- [7] J. M. Mooney, F. D. Shepherd, W. S. Ewing, J. E. Murguia, and J. E. Silverman, "Responsivity Non-uniformity Limited Performance of Infrared Cameras", Optical Engineering, Vol. 28, No. 11, pp. 1151-1161, 1989.
- [8] David L. Perry, "Linear Theory of Nonuniformity Correction in Platinum Silicide Focal Plane Arrays", Proc. of SPIE, Vol. 1762, Infrared Tech. XVIII, pp. 60-69, Jan., 1993.
- [9] TMS320C3x User's Guide, Texas Instruments, 1994.
- [10] 한국생산기술연구원, "열상 센서의 신호처리 기술 개발", 생산기술연구사업 기술보고서, 2000.