

320×240 적외선 배열검출기를 이용한 고분해능 열상 신호처리기 구현

High Resolution Electronic Processor Design for Thermal Imager with 320×240 Staring Array Infrared Detector

홍 석 민*
Hong, Seok Min

유 위 경*
Yu, Wee Kyung

윤 은 숙*
Yoon, Eun Suk

ABSTRACT

This paper describes the design principles and methods of electronic processor for thermal imager with 320×240 staring array infrared detector. For the detector's nonuniformity correction and excellent image quality, we have designed the multi-point correction method using the defocusing technique of the optics. And to enhance the image of low contrast and improve the detection capability, the new technique of histogram processing has been designed. Through these image processing techniques, we have developed the high quality thermal imager and acquired a satisfactory thermal image. The result of MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference) is 0.1°C at 4cycles/mard.

주요기술용어(주제어) : Thermal Imaging System(열상장비), Image Processing(영상처리), NUC(불균일 보정), CEM(대조비 향상), Micro Scanner(미세주사장치)

1. 머리말

열상장비는 물체에서 방사되는 적외선 복사에너지를 검출하여 영상화하는 장비로서 주야간 영상 획득이 가능한 첨단 기술의 영상장비이다. 최근의 열상장비는 고감도의 초점면 배열(focal plane array) 중적외선(3~5 μ m) 및 원적외선(8~12 μ m) 검출기를 이용한 고성능 장비로 발전하고 있으며 특히 중적외선 영역에서는 이차원 배열 검출기를 이용한 비주사방식 열

상장비로 발전되고 있다. 비주사방식 열상장비는 고밀도의 이차원 배열 검출기를 사용함으로써 시스템의 소형 경량화와 함께 높은 온도분해능을 갖는다. 그러나 신호처리기 개발 측면에서는 검출기 구조 및 특성에 따른 새로운 영상처리 기법들이 요구된다^[1,2].

본 논문은 비주사방식 열상장비 신호처리기 설계에 관한 것으로 사용되는 중적외선 영역의 이차원 배열 적외선 검출기는 일반 가시광선 검출기들과는 달리 구조가 복잡하고, 출력신호가 매우 미약하다. 특히, 검출 소자간 응답 특성 차이는 영상의 불균일을 발생시켜 화질을 악화시키는 심각한 문제를 발생한다. 따라서 이차원 배열 검출기를 이용하는 열상시스템에서는 검출기 불균일 보정처리가 필수적이며, 핵심기술

† 2006년 2월 13일 접수~2006년 5월 17일 게재승인

* 국방과학연구소 기술연구본부(ADD)

주저자 이메일 : hongsm@add.re.kr

로서 영상 화질뿐만 아니라 전체 시스템 성능을 좌우한다.

한편, 적외선 열영상은 가시광선 영상에 비해 대조비(contrast) 성분이 작아 영상이 선명치 못하며, 관측시 최적 영상 제어가 어려워 표적과 배경간의 물체 식별이 용이하지 못한 특성을 가진다. 물체 식별 능력을 향상시키기 위해서는 열영상 특성에 적합한 새로운 영상제어 알고리즘과 그에 따른 대조비 최적 제어 기법이 필요하다. 그리고 이러한 영상처리 기법들을 효율적으로 실시간 처리하기 위해서는 최신 신호처리 소자의 응용 및 구현 기술 또한 매우 중요하다.

본 연구에서는 비주사방식 열영상 신호처리에 필요한 영상처리 기법들을 제안하였으며, TMS320C80 DSP(Digital Signal Processor) 프로세서를 이용한 실시간 디지털 영상처리기 설계를 통해 고성능 열상 시스템을 구현하였다.

아울러 이차원 배열 적외선 검출기의 한정된 소자수에 의해 제한되는 열상 시스템의 분해능 향상을 위한 소형·고성능의 미세 주사장치(micro scanner)를 개발하였다. 개발된 미세 주사장치는 320×240 배열로 제한되는 열상장비의 광학적 분해능을 개선하기 위해 고안된 주사장치로, 광로에 존재하는 축거울 2개에 미세 주사 메커니즘을 적용하여 640×480 배열의 30만 화소급 열영상을 획득하게 한 것이다.

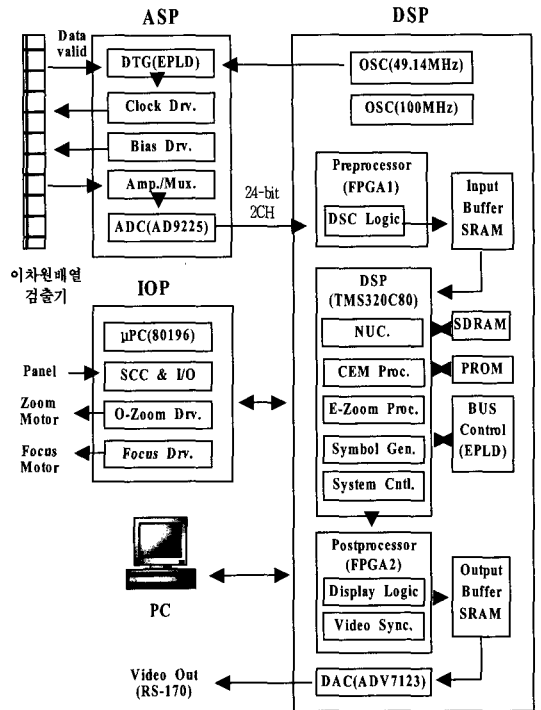
본 논문에서는 먼저 신호처리기 전체 구성에 대해서 간략히 언급한 뒤, 제안된 주요 영상처리 기능에 대한 설계 이론과 구현 방법을 제시하였으며, 성능시험 결과를 기술하였다.

2. 열영상 신호처리기 설계

가. 신호처리기 구성

신호처리기 설계와 관련하여 본 열상장비에서 사용한 중적외선 검출기는 감도특성이 우수한 MCT(HgCdTe) 재질의 프랑스 Sofradir사 320×240 IDDCA(Integrated Detector Dewar and Cooler Assembly)이다.

전체 신호처리기 구조는 그림 1과 같으며, ASP(Analog Signal Processor)와 DSP 및 IOP(Input/



[그림 1] 신호처리기 구성도

Output Processor)의 세 기판으로 구성하였다. ASP 기판은 검출기 인터페이스부로서 검출기 정밀 구동 및 제어를 통해 적외선 영상신호를 검출하는 곳이며, 14-bit A/D 변환하여 DSP 기판으로 전달한다. DSP 기판은 주요 영상처리 기능을 수행하는 곳으로 14-bit 검출신호를 받아 검출기 불균일 보정과 열영상 대조비 제어 및 영상 확대처리 등을 통해 열영상을 획득한 뒤, 최종 RS-170 비디오신호로 만들어 모니터에 전달한다. 그리고 IOP 기판에서는 외부 패널(Panel)과의 통신을 통해 열영상 획득기능을 조절하도록 하였다.

나. 검출기 출력 불균일 보정

검출기 불균일은 동일 입력신호에 대해 검출 소자간 출력값이 일정치 않고 서로 차이 나는 것을 의미하며, 소자간에 이득과 오프셋 성분이 불균일하기 때문에 발생한다. 불균일 보정이란 이득과 오프셋 차이를 보정하여 동일 입력신호에 대해 출력크기를 일정하게 하여 화질의 균질성을 개선시키는 것이다. 열영상 화

질은 검출기 불균일 보정에 달려 있으며, 불균일 보정을 통해 영상의 공간잡음을 검출기 NETD(Noise Equivalent Temperature Difference) 수준 이하로 줄여야만 우수한 열영상 획득과 함께 최대 시스템 성능을 보장할 수 있다.

본 열상장비에서 사용한 320×240 이차원배열 검출기는 MCT 재질로서 NETD 성능이 50mK(T=300K, Ti=4ms)로 상당히 우수하다. 반면에 검출신호 불균일도는 6.5%로 매우 떨어진다. 그림 2는 대표적인 검출 소자들의 출력특성을 측정한 그래프로서 그림에서와 같이 검출 소자간 특성 차이가 심하고 온도에 따라 비선형적이다. 검출기 불균일 특성을 종합적으로 분석 요약하면 다음과 같다.

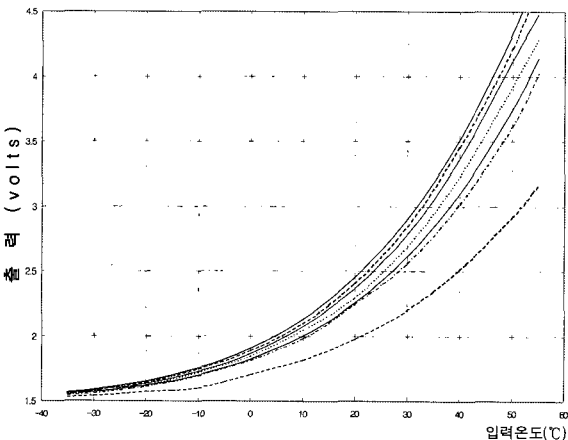
- ① 소자간 이득과 오프셋 성분이 모두 불균일
- ② 입사에너지에 따라 불균일 특성이 비선형적
- ③ 시간에 따라 오프셋 성분이 불안정하게 변화

출력크기를 결정하는 이득과 오프셋 두 성분이 모두 불균일하며 비선형적이고, 특히 오프셋 성분은 시간에 따라 변하는 불안정성을 가진다. 장시간(1시간 이상) 운용시 오프셋 크기가 미세하게 변하여 영상의 불균일을 야기시키게 된다.

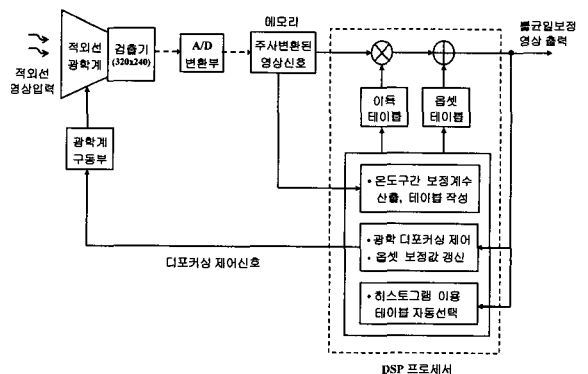
검출기 출력 특성 분석 결과, 본 검출기는 이득과 오프셋에 대해 비선형적인 불균일 보정이 요구되며, 필요시 오프셋 보정계수를 특성 변화에 맞게 갱신할 수 있어야 할 것으로 나타났다. 기존의 보정 방법은 기준온도 소스(source)를 시스템 내부에 설치하거나

chopper를 사용하여 보정계수를 산출하는 방식이 있는데, 이 방식들은 기구적인 구조가 복잡하고 기준온도 소스를 정밀제어해야 하는 단점이 있다^[3]. 본 신호처리기에서는 효과적이면서 간단한 방법으로서 온도 구간별 보정계수 테이블과 함께 광학계 디포커싱을 이용한 Multi-Point 불균일 보정 방법을 개발하였다.

자세한 불균일 보정 개념도는 그림 3과 같다. 먼저 비선형적인 불균일 보정을 위해 온도구간을 4단계로 선형화하였으며, 미리 각 단계별로 기준온도 신호를 입력하여 이득과 오프셋 보정 계수를 구하고 테이블에 저장한다. 온도구간은 실험결과 기본적으로 저온과 상온 및 고온의 3단계가 요구되었으며, 정밀도와 구현시 메모리 용량을 고려하여 최종 4단계로 설정하였다. 보정 테이블 선택은 입력영상의 히스토그램 분포를 이용하여 입력온도에 따른 영상의 크기 분포에 맞게 각 단계가 자동으로 선택되게 하였다. 불안정한 오프셋에 대해서는 시스템 초기 작동시 광학계의 초점을 흐리게 디포커싱시켜 입력영상의 전 영역을 균일하게 만든 뒤, 이때의 균일한 입력영상을 기준온도 신호로 이용하여 보정계수를 갱신하도록 하였다. 즉 실제 입력영상의 평균 온도분포를 기준신호로 이용함으로써 영상의 불균일 보정오차를 최소화시킬 수 있도록 하였다. 이러한 초기화 과정이 끝나면 정상동작 상태에서 입력신호에 대해 이득은 곱하고 오프셋은 더하여 불균일 보정을 수행한다. 기본적으로 이득 보정값은 테이블로 고정하였으며, 오프셋은 매번 시스템 작동시 자동으로 갱신시키고 필요시 외부 패널에서 제어 명령을 통해 새롭게 갱신할 수 있도록 하였다.



[그림 2] 검출기 출력 특성 곡선



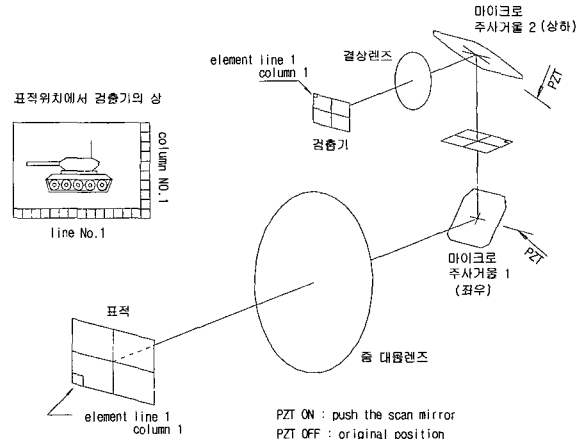
[그림 3] 검출기 불균일 보정 개념도

이 방법은 별도의 기구 광학적인 구성없이 광학 디포커싱을 통해 실제 입력 영상온도에 가장 적합한 보정계수를 산출함으로써 효율적으로 보정오차를 최소화시킨 방식이다.

다. 열영상 대조비 개선

열영상은 농도분포가 전 영역에 걸쳐 고르지 못하며, 특히 배경과 표적신호 성분은 서로 분리되어 일부 영역에 편중되는 경향이 있다. 따라서 단순히 신호 이득 조절로는 대조비 최적 조정이 어려워 물체 식별이 제한된다. 최적 조정을 위해서는 기본적으로 농도분포 변환이 필요하며, 일반적인 방법으로서 히스토그램 평활화법이 있다. 이는 상대적인 농도분포 크기를 비교하여 전 영역에 걸쳐 펼쳐는 방식으로 대조비 개선 효과가 우수하기 때문에 가시광선 영상처리에 많이 이용한다^[4]. 그러나 열영상에서는 표적의 농도 분포 크기가 작아 배경이 과도하게 펼쳐지면서 오히려 표적이 악화될 수 있다.

본 영상 처리기에서는 이러한 열영상의 농도분포 특성을 이해하여 그에 적합한 대조비 제어 방법으로서 히스토그램 크기를 제한하는 농도 분포 변환 기법을 개발하였다^[5]. 이 방법은 농도 분포 비교시 전체 히스토그램 크기를 모두 비교하지 않고, 입력 영상에 따라 크기 레벨을 제한한다. 즉, 히스토그램 크기를 제한하여 큰 영역이 상대적으로 과도하게 펼쳐지는 것을 막는 방식이다. 그림 4에 히스토그램 가변방식 농도분포 변환 알고리즘을 보인다. 먼저, 입력 영상으로부터 기본 히스토그램 함수를 구한 뒤, 전 영역에 걸쳐 히스토그램 크기를 P값으로 제한한다. 그 다음

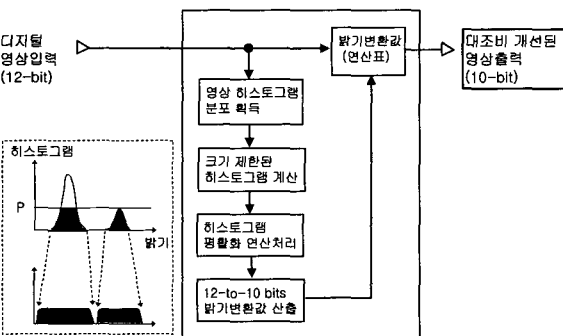


[그림 5] 미세주사장치 개념도

P값으로 가변된 히스토그램을 평활화시켜 모든 영역이 골고루 펼쳐지도록 하였다. 그림의 결과를 보면 농도분포 크기가 서로 다른 두 영역이 서로 비슷하게 펼쳐져 대조비가 효과적으로 개선됨을 알 수 있다. 여기서 히스토그램 크기를 제한하는 P값은 시스템 제어판넬에서 운용자가 영상에 맞게 수동으로 조절할 수 있도록 하였다.

라. 미세주사장치

열상장비 분야에 있어서 미세주사장치의 응용은 처음 영국 RSRE의 D. J. Bradley^[6]에 의해 64×64 배열의 HgCdTe 검출기를 사용하고 PZT로 거울을 구동하는 3×3 step의 미세주사장치가 제안된 이래 다양한 여러 가지 방법이 제안되었다^[6~8]. 열상장비에 사용하는 검출기는 크기가 크고 냉각장치와도 기계적으로 결합되어야 하므로 검출기를 직접 움직여 주는 미세주사 방식은 사용할 수 없다. 본 논문에서는 비주사방식 열상장비의 광로에 있는 2개의 거울을 이용, 이를 PZT로 정밀하게 제어하는 방식의 미세주사장치를 구현하였다. 즉, 검출기 앞에 놓이는 광학계의 중간에 축거울(folding mirror)을 놓아 광로를 접고, 이 거울을 원하는 양의 영상 이동을 얻을 수 있도록 tilt 시키는 것이다. 이 경우 별도의 주사장치가 시스템에 추가되는 것이 아니라 거울을 구동시키는 actuator만 추가하면 되므로 소형 장비로 구성할 수 있으며, 거울을 사용하기 때문에 주사장치에 의해 광학적 색수



[그림 4] 히스토그램 가변방식 대조비 제어

차를 유발하지 않는 장점이 있다. 이 때 actuator의 구동 거리가 수 마이크로에 불과하므로 본 논문에서는 동적 특성이 좋은 PZT actuator를 사용하였다.

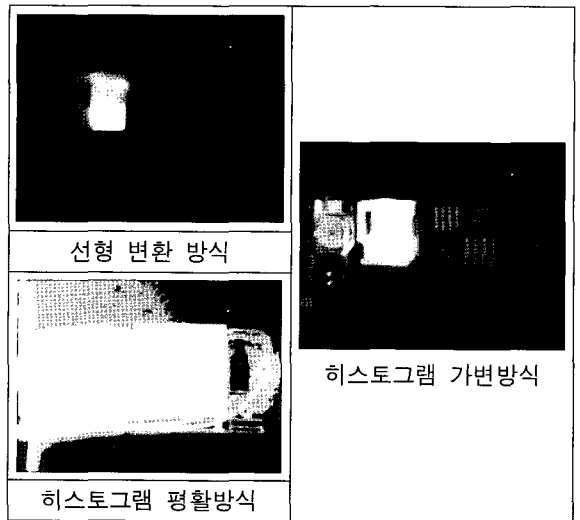
3. 제작 및 결과

그림 6은 제작된 열상장비와 신호처리 회로를 보인다. 이미 소개된 바와 같이 전자회로는 ASP, DSP 및 IOP로 구성되어 있다.

불균일 보정 방법은 광학 디포커싱을 통해 입력영상을 기준온도로 이용함으로써 영상의 불균일 보정 오차를 최소화시킨다. 이미 언급된 바와 같이 본 검출기는 소자간 불균일도가 6.5%로서 상당히 떨어진 다. 보정 성능을 측정하기 위해 균일한 온도의 입력 영상에 대해 최종 보정된 검출기 출력영상의 불균일도 즉 평균값에 대한 출력 분산 정도를 측정하였다. 측정 결과 불균일도는 0.1%로 아주 우수하게 나타났 으며, 특히 보정 영상의 NETD 값은 50mK 이하로 측정되었다. 이는 검출기 NETD 수준으로서 최적 보 정 성능임을 보여주며, 이를 통해 영상의 공간잡음이 최소화된 균일한 열영상을 획득할 수 있었다. 그림 7에 0.5°C 온도차를 갖는 열 막대표적에 대해 보정 전 검출기 출력 영상과 보정 후 영상을 비교하였다. 보 정 전 영상은 검출소자간 불균일 패턴으로 인해 표적



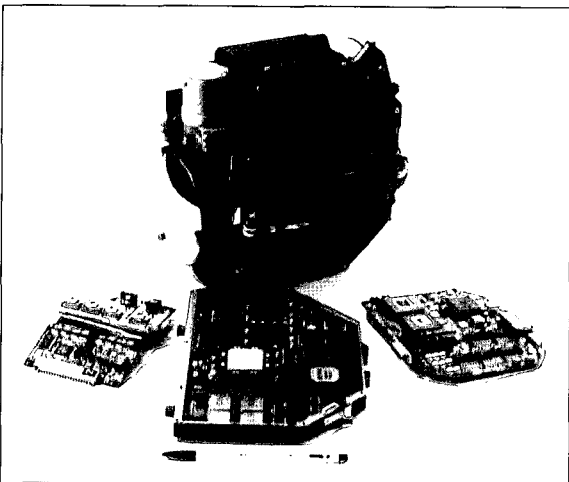
[그림 7] 불균일 보정 결과



[그림 8] 대조비 향상 결과

식별이 전혀 불가능함을 알 수 있으나, 그에 반해 보 정 영상은 작은 막대표적까지 뚜렷하게 구별됨을 알 수 있다.

한편 본 논문에서 제안된 대조비 제어 방법과 함께 기존의 선형 변환 및 히스토그램 평활화 방법을 같이 비교 분석하였다. 그림 8에 동일한 입력 열영상에 대해 각각의 방법으로 대조비와 밝기를 제어한 출력영상을 나타내었다. 입력 열영상은 중앙에 열막대 표적이 위치하고 좌측에 뜨거운 커피포트 그리고 우측에 차가운 물병이 놓여 있다. 먼저 선형 변환된 영상을 보면 뜨거운 커피포트는 자세히 보이지만 그 보다 온도가 낮은 다른 물체들은 어두워 잘 보이지 않는다. 밝은 부분이 잘 보이도록 조절하면 다른 부분은 너무 어둡게 되며 이는 반대로도 마찬가지다. 즉, 전체 열영상을 재현하는데 있어 제약이 따른다. 한편 히스토

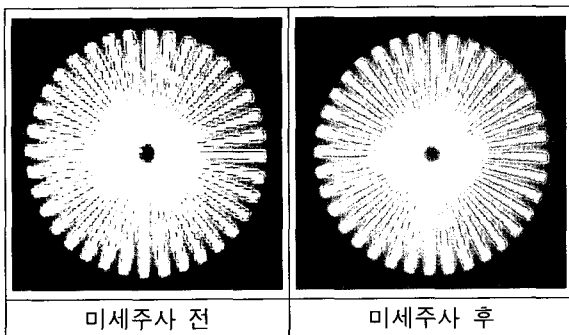


[그림 6] 제작된 비주사방식 열상장비

그림 평활화 방법은 전반적으로 어두운 부분이 과도하게 펼쳐지면서 밝은 부분이 포화되어 나타나며, 차가운 물병은 뚜렷하게 보이지만 높은 온도신호들은 서로 구별이 되지 않는다. 이에 비해 제안된 대조비 제어 방법은 한쪽으로 과도하게 치우치지 않고 각각이 골고루 잘 표현된 선명한 영상을 보여주며, 중앙의 막대표적이 세밀히 구별됨을 알 수 있다. 본 방법은 열영상에 적합한 대조비 제어 기법으로서 히스토그램 크기 조절을 통해 표적과 배경의 물체 식별능력을 극대화시킨다.

미세주사장치에 의한 분해능 향상 효과는 부채살 모양의 star sector 표적을 제작하여 영상을 분석하였으며 그림 9와 같은 결과를 보여준다. 그림 9에서 좌측은 미세주사장치를 사용하지 않은 상태 즉, PZT의 구동신호를 끈 상태로 획득한 영상이고 우측은 미세주사장치를 사용한 상태에서 획득한 영상이다. 그림에서 보면 미세주사를 끈 상태에서는 표적 가장자리의 공간주파수가 낮은 부분은 살이 구분되나 중앙에 가까워지면서 aliasing이 되어 구분이 안 되는 것을 알 수 있다. 또한 45° 기울기로 놓인 살을 보면 선이 반듯하지 못한 것을 알 수 있다. 반면에 미세주사를 한 영상은 거의 표적 중심부까지도 살이 구분되는 것을 알 수 있으며, 공간 분해능이 월등히 향상되었음을 확연히 보여준다.

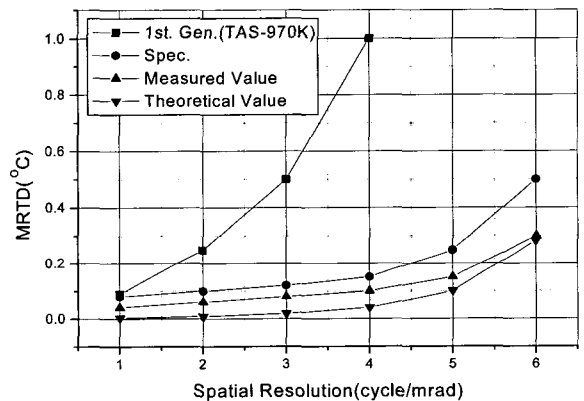
본 열상장비의 검출소자 한 개의 수평방향 크기인 30 μ m에 해당하는 기준 공간주파수는 16.7cycles/mm이다. 그러나 이 주파수는 미세 주사를 하기 이전이며 이상적인 미세주사를 할 경우 Nyquist 주파수는 33cycles/mm로 증가한다. 단, 이 주파수는 시스템적



[그림 9] 미세주사 효과

으로 완벽하게 구현하기는 불가능하며 정량적인 측정을 위하여 4-bar 표적을 제작하여 향상된 분해능을 측정할 결과 완전한 640×480 배열을 갖고 동일한 시계를 갖는 열상장비 분해능의 84%에 해당하는 27.6cycles/mm(7.6cycles/mrad) 까지 분해되는 것을 확인하였다.

열상장비의 종합적인 성능은 일반적으로 최소분해가능온도차(MRTD : minimum resolvable temperature difference)의 결과로 평가한다. 이 개념은 특정 크기의 표적이 배경과 얼마나 작은 온도차를 가질 때 식별 가능한가를 표적의 공간주파수 함수로 표현한 것이며, 실제로 종횡비가 7:1 인 막대표적 4개를 표적 넓이 간격으로 균일하게 세운 뒤 표적과 배경의 온도



[그림 10] 열상장비의 최소분해가능온도차



[그림 11] 야외 시험영상(야간)

차를 줄여가면서 막대표적이 분해가 되는 최소온도를 측정한다. 본 시스템의 MRTD 측정값과 함께 야의 시험영상을 그림 10 및 그림 11에 나타내었다.

측정된 MRTD 곡선을 보면, 설계 이론치에 거의 근접하는 최적성능을 보여 주고 있으며, 표준 MRTD 값은 4cy/mrad에서 0.1℃를 얻었다. 이는 기존 1세대 열상장비(TAS-970K)에 비해 성능이 2배 이상 대폭 향상된 결과이다.

4. 맺음말

본 논문에서는 이차원배열 적외선 검출기를 이용하여 독자적으로 개발된 열영상 신호처리기에 대한 설계 및 구현 방법을 자세히 기술하였다. 검출소자간 정밀 불균일 보정을 위해 광학 디포커싱 방식의 Multi-Point 불균일 보정법을 개발하였으며, 검출기 NETD 수준의 최적 보정성능을 통해 영상의 공간잡음을 최소화시킬 수 있었다. 그리고 히스토그램 가변 방식 농도변환 기법으로 열영상의 대조비를 최적으로 조절하도록 하였으며, 이를 통해 표적 식별능력을 향상시켰다.

아울러 320×240 배열의 중적외선 대역 MCT 검출기를 사용하는 열상장비의 분해능 향상을 위한 소형·고성능의 미세주사장치를 개발하였다. 개발된 미세주사장치를 열상장비에 적용하여 분해능 개선 효과를 측정한 결과 미세 주사장치의 적용 전의 시스템 한계 분해능인 4.5cycles/mrad을 넘어선 7.6cycles/mrad의 표적까지도 분해되는 것을 확인할 수 있었다. 영상의 재현 화소수도 320×240 배열의 76,800개 화소로부터 640×480 배열의 30만 화소급 영상을 획득할 수 있었다. 따라서 개발된 미세주사장치는 적은 검출소자수를 갖는 소형, 경량화된 열상장비에 표적의 탐

지능력을 향상시킬 수 있는 방법으로의 다양한 응용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J. L. Miller, *Principles of Infrared Technology*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1994.
- [2] J. S. Accetta and D. L. Shumaker, *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook*, ERIM and SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [3] M. Broekaert and Bruno Noel du Payrat, "Nonlinearity & nonuniformity corrections for IRIS family of IRCCD thermal imagers", *SPIE*, Vol. 2269, pp.507~523, 1994.
- [4] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison Wesley publishing, 1993.
- [5] 홍석민, 유위경, 윤은숙, "열상장비의 실시간 영상 신호처리", *군사과학기술학회논문지*, 제7권, 제4호, pp.79~86, 2004. 12.
- [6] F. Blommel, P. Dennis, D. Bradley, "The effects microscan operation on staring infrared sensor imagery", *SPIE* Vol. 1540, pp.653~664, 1991.
- [7] J. Sanders, W. Wan, V. Harris, D. Newton, G. Tyllinski, M. Wolschon, J. Imamura, "Compact airborne staring FPA sensor with microscanning", *SPIE* Vol. 2743, pp.158~168, 1996.
- [8] J. Fortin, P. Chevrette, "Realization of a fast microscanning device for infrared focal arrays", *SPIE* Vol. 2743, pp.185~196, 1996.