한국군사과학기술학회지 제13권 제2호, pp. 328~335, 2010년 4월

학술논문 센서 · 신호처리 부문

초분광 분해기의 광학계 설계 및 영상 처리

Optical System Design and Image Processing for Hyperspectral Imaging Systems

허 아 영* 최 승 원* 이 재 훈* 김 태 형** 박 동 조*
Ayoung Heo Seungwon Choi Jae-Hoon Lee TaeHyeong Kim Dong-Jo Park

Abstract

A hyperspectral imaging spectrometer has shown significant advantages in performance over other existing ones for remote sensing applications. It can collect hundreds of narrow, adjacent spectral bands for each image, which provides a wealth of information on unique spectral characteristics of objects. We have developed a compact hyperspectral imaging system that successively shows high spatial and spectral resolutions and fast data processing performance. In this paper, we present an overview of the hyperspectral imaging system including the strucure of geometrical optics and several image processing schemes such as wavelength calibration and noise reduction for image data on Visible and Near-Infrared(VNIR) and Shortwave-Infrared(SWIR) band.

Keywords : Spectrometer, Optical Design, Hyperspectral Imaging Systems, VNIR & SWIR Images

1. 서 론

영상 분광 분해기란 2차원 공간의 영상 정보와 각 화소의 파장 정보를 동시에 획득하여 3차원의 데이터를 얻을 수 있는 장치를 말하며, 그 중에서도 파장 분해능이 10nm 이하의 영상 분광 분해기를 초분광 분해기(Hyperspectral Imaging System)라 한다. 이는 입사되는 빛을 분광시켜 영상의 각 화소에 대한 스펙트럼을 측정하는 전자 광학 센서로서 물질마다 가지고 있는 고유의 광학적 성질 및 물질의 흡수와 반사 특징을 분석하는 장치이다.

초분광 분해기의 구현 방식에는 x, y 방향으로 스캔하여 정보를 얻는 Whisk-broom 방식, 필터를 이용하여 분광 정보를 얻는 Filtered-camera 방식, 1차원 라인 영상을 가로축으로 스캔하여 3차원 영상을 얻는 Push-broom 방식 등이 있다

Push-broom 방식[1]으로 동작하는 초분광 분해기는 영상 스캔, 영상 분광 그리고 영상 병합 이렇게 세 단계로 진행 된다. 첫 번째 영상 스캔 단계에서 회전하는 거울과 슬릿을 이용하여 피사체에 대해 가로축으로 스캔하면서 매번 슬릿을 통과한 1차원 선 영상을 획득하고, 두 번째 영상 분광 단계에서 획득된 1차원 선 영상을 분광시켜 2차원의 스펙트럼을 추출한다. 그리고 마지막 영상 병합 과정에서 추출된 2차원 스펙

† 2010년 1월 25일 접수~2010년 3월 19일 게재승인
* 한국과학기술원 전기및전자공학과(Department of Electrical Engineering, KAIST)
** 한국과학기술원 물리학과(Department of Physics, KAIST)
책임저자 : 허아영(hay507@kaist.ac.kr)

트럼들을 순차적으로 모아 3차원 초분광 데이터 영상을 얻는 것이다.

초분광 분해기는 빛의 분광 대역에 따라 분류될 수 있으며 빛을 파장에 따라 분류하면 Fig. 1과 같다. 회색 부분의 파장 대역은 지구 대기에 의해서 크게 감소되는 부분이고 그 외의 부분을 살펴보면 0.4~0.7㎛ 대역은 가시광 영역이고 적외선 부분은 SWIR(0.7~2㎛, 단파장 적외선), MWIR(3~5㎛, 중파장 적외선) 그리고 LWIR(8~12㎛, 장파장 적외선)으로 나뉜다. 우리는 VNIR(0.4~0.9㎛, 가시광 및 근적외선) 대역과 SWIR (0.9~1.7㎛) 대역을 분광하는 초분광 분해기를 제작하였다.

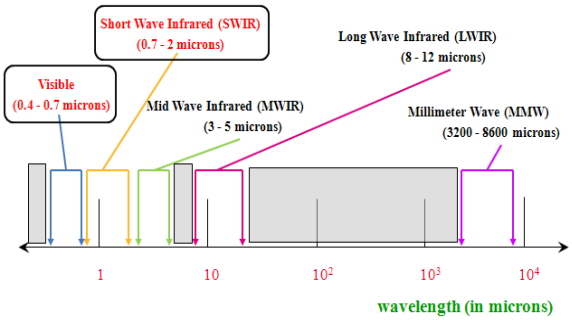


Fig. 1. 빛의 파장 분류

이는 육안으로 구분하기 힘든 경우에도 스펙트럼의 차이를 이용하여 물질을 감별할 수 있다. 이런 특성을 이용하여 초분광 분해기는 군용으로 위장된 적을 탐지하거나 위조지폐나 환경오염 물질 등을 검출하는데 사용될 수 있다.

현재는 인공위성에 탑재된 초분광분해기를 통해 얻은 자료를 이용하여 환경 조사, 자원 탐사, 농업 식량 예측, 해양 오염 분석 등 여러 응용 분야에 사용하고 있다[2~4]. 특히 국내에서도 다목적실용위성 아리랑 1호에 탑재되어 있는 해양관측카메라(OSMI : Ocean Scanning Multi-Spectral Imager)의 자료를 이용하여 해양의 식물성 플랑크톤의 농도 변화를 지속적으로 관찰하는데 이용되고 있으며, 적조나 황사 모니터링은 물론 태풍의 경로를 모니터링 자료로 활용하고 있다. 하지만 선진국에 비해 초분광분해기 설계 기술 및 처리 소프트웨어에 대한 기반 기술에 대한 국내 연구가 부족한 상태이다.

우리는 광학부에 해당하는 분광 설계 기술과 전자부에 해당하는 영상처리 부분으로 나눠 연구를 진행하고 VNIR 대역과 SWIR 대역의 초분광 분해기를 제작하였다. 특히 영상처리 부분은 영상 획득 후 파장 미세 보정을 통해 얻어진 3차원 영상 데이터를 가공 분석하는 기법에 대해서 연구를 수행하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 초분광 분해기의 광학부 소개와 초분광 분해기를 위한 광학부 분광 설계 기법에 대해 알아보도록 한다. 그리고 제3장에서는 파장 미세 보정과 같은 영상처리 방법에 대해 설명한다. 제4장에서는 초분광 분해기를 통해서 얻어진 초분광 영상에 대한 파장별 특성을 분석하고 여러 가지 예제를 통해서 초분광 분해기의 응용분야에 대해서 살펴보겠다. 제5장에서 이 논문의 결론과 요약을 서술한다.

2. 초분광 분해기 광학부 설계 기술

이 장에서는 초분광 분해기의 광학부 소개와 초분광 분해기를 위한 광학부 설계 방법에 대해 설명한다.

가. 초분광 분해기 광학부

초분광 분해기는 파장 정보와 공간 정보를 얻는 방식에 따라 광학부 구조가 결정된다. 본 논문에서는 1차원 공간 정보와 1차원 파장 정보를 얻고 1차원 공간 정보와 수직한 방향으로 스캔하면서 나머지 공간 정보를 획득하는 Push-broom 방식의 초분광 분해기에 대한 연구를 수행하였다.

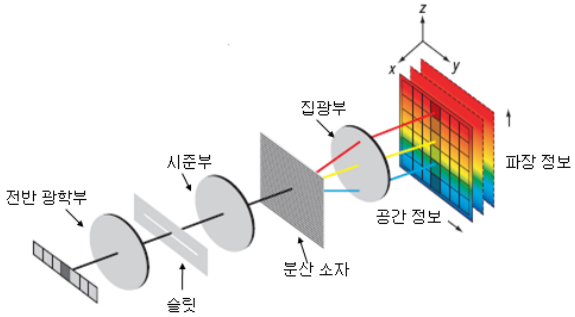


Fig. 2. Push-broom 방식의 초분광 분해기 광학부 구조[5]

Fig. 2에서 초분광 분해기 광학부의 개략적인 구조를 보면, 맨 앞에 추가적인 1차원 공간 정보를 획득하기 위한 스캔부, 원하는 위치에 1차원 공간 정보를 획득하기 위한 전반부 광학부와 슬릿, 선택된 1차원 공

간 정보를 분산 소자에 비춰지기 전에 평행광으로 만들어 주는 시준부, 빛을 분산시켜 주는 분산 소자, 마지막으로 시준되어 분산 소자에 분산된 빛을 모아 주는 집광부로 구성되어 있다.

나. 초분광 분해기 광학부 설계

Push-broom 방식의 초분광 분해기의 광학부를 기하광학적 광선 추적을 이용한 광학 설계 프로그램을 이용하여 설계하였다. 제작을 위하여 상용 반사형 회절격자의 사양을 바탕으로 설계를 수행하였다. 두 개의 거울을 이용하여 비점수차를 보정하는 방식으로 초기 설계를 수행하였으며, 최적화 과정에서 성능 향상을 위하여 비구면 거울을 사용하였다. 최종적으로 Fig. 3에서와 같이 오목 형태의 2개의 비구면 거울과 볼록 형태의 1개의 비구면 거울을 이용하여 독자적인 형태의 초분광 분해기 광학부 설계를 완료하였다.

400～900nm 파장 영역과 900～1700nm 파장 영역의 초분광 영상을 얻을 수 있는 2가지 형태의 초분광 분해기 광학부 설계를 완료하였다. 형태는 똑같으나 400～900nm 영역의 초분광 분해기의 경우 회절 격자 수가 150grooves/mm이고, 중심 파장 500nm인 반사형 평면 회절 격자를 사용하였으며, 900～1700nm 영역에선 회절 격자 수가 85grooves/mm, 중심파장이 1300nm인 반사형 평면 회절 격자에 대하여 설계를 수행하였다.

400～900nm 파장 영역의 초분광 분해기 광학부는 F/# = 2.4에, Fig. 4에서 Spot diagram에서 모든 점들이 14.5㎛ 박스(이 영역에서 사용되는 CCD(Charge-Coupled Device, 전하결합소자) pixel의 크기) 안에 들어 포함되는 것을 알 수 있으며, MTF(Modulation Transfer Function, 변조전달함수)도 회절 한계에 거의 근접하며, 35lines/mm에서 80% 이상의 MTF 값을 가짐을 알 수 있다.

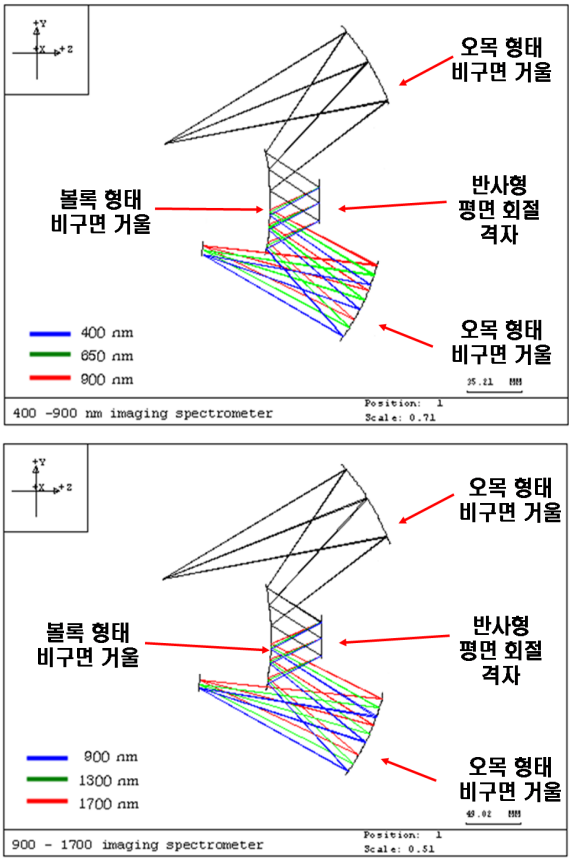


Fig. 3. 400～900nm(위)와 900～1700nm(아래) 영역의 초분광 분해기 광학부 최종 형태

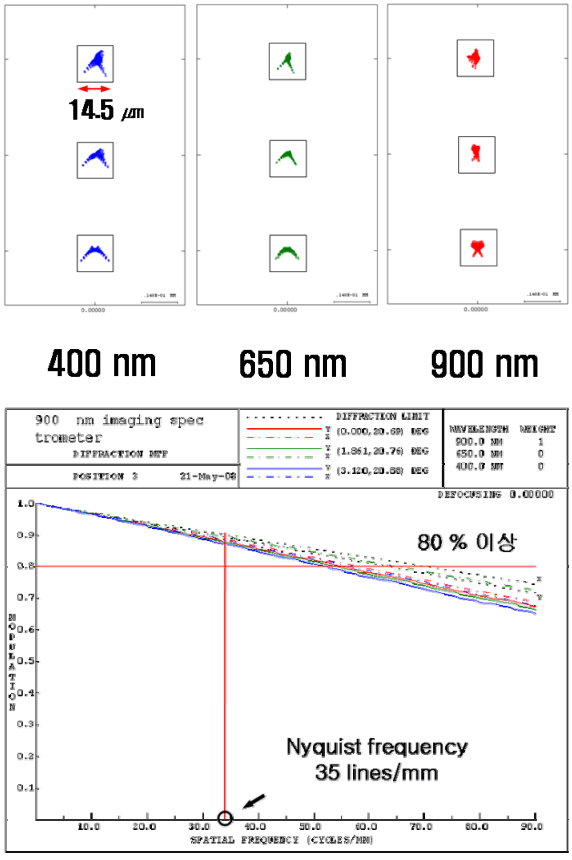


Fig. 4. 400～900nm 영역의 초분광 분해기 광학부 Spot diagram(위)과 MTF 특성(아래)

900～1700nm 파장 영역의 초분광 분해기의 광학부 경우 F/# = 2.4에서, Fig. 5에서 Spot diagram에서 모든 점들이 20㎛ 박스(이 영역에서 사용되는 CCD pixel의 크기), MTF도 회절 한계에 거의 근접하며, 35lines/mm 에서 80% 이상의 MTF 값을 가짐을 알 수 있다.

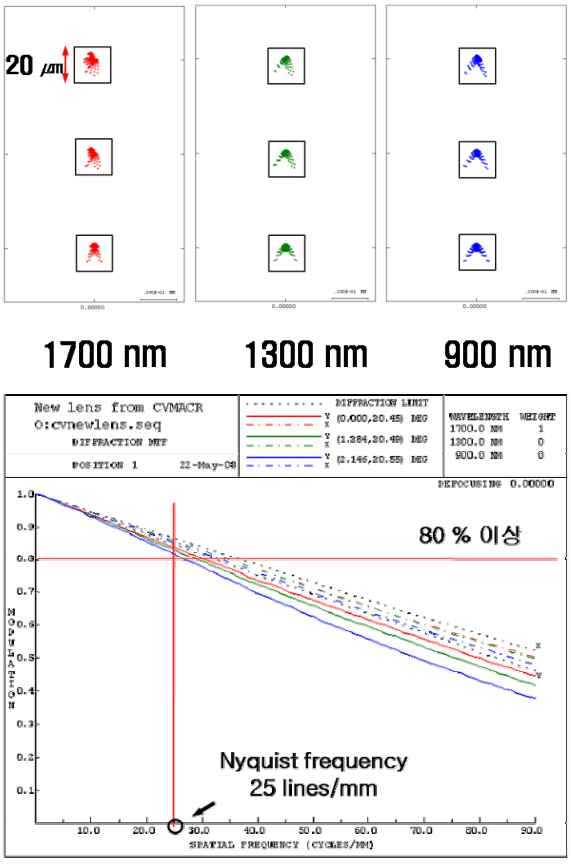


Fig. 5. 900～1700nm 영역의 초분광 분해기 광학부 Spot diagram(위)과 MTF 특성(아래)

3. 초분광 분해기 영상 처리

앞 장에서와 같이 설계된 광학부를 통해서 분광된 스펙트럼은 카메라 센서로 초분광 영상을 얻는다. 이렇게 얻어진 영상은 Table 1과 같은 사양을 만족하도록 가공된다.

카메라 센서의 좌표 값을 스펙트럼의 파장 값으로 매핑해주는 파장 미세 보정 과정에서 VNIR 대역과 SWIR 대역 모두 120 밴드를 갖도록 했으면 이로 인해 VNIR 대역은 4.16nm/band 분해능을, SWIR 대역은 6.66nm/band 분해능을 갖는다. 이 때 영상의 해상도는 VNIR 대역은 640×640, SWIR 대역 320×320 이다.

이렇게 얻어진 초분광 영상은 다분광 영상보다 훨씬 더 작은 분해능 값을 갖으므로써 물질의 주파수 특성을 더 정확하게 얻을 수 있다.

영상 분광 단계에서 카메라 센서를 통해 얻어진 2차원 스펙트럼 영상의 세로축(Spatial Axis)은 공간 좌표이고 가로축(Spectral Axis)은 스펙트럼 좌표이다. 이 때 가로 좌표와 실제의 파장을 매핑하는 과정이 파장 미세 보정이다.

특히 분광계와 카메라 센서 사이의 정렬이나 기타 문제 등으로 인하여 왜곡이 생길 수 있는데 이를 보정하기 위하여 파장 미세 보정은 반드시 필요하다.

파장 미세 보정은 이미 파장의 스펙트럼을 알고 있는 광원 램프를 사용하여 초분광 분해기에 빛을 입사하게 한 후 그 빛의 스펙트럼이 맺히는 카메라 센서의 가로 좌표를 알아냄으로써 해당 화소의 파장 값을 알아낸다[6].

광원 램프는 광원 소스에 따라 고유의 주파수 특성을 가지는데 VNIR 대역 초분광 분해기는 0.4～0.9㎛ 대역에서 스펙트럼 특징을 나타내는 수은-아르곤 광원 램프를 사용하였으며 SWIR 대역 초분광 분해기는 0.8～1.6㎛ 대역에서 스펙트럼 특징을 나타내는 크립톤 광원 램프를 사용하였다. Fig. 6은 수은-아르곤 램프의 주파수 특성을 나타내며 Fig. 7은 크립톤 램프의 주파수 특성을 나타낸다.

이 휴대용 램프를 이용하여 기준이 되는 빛을 분광계에 입사시킨 후 카메라 센서로부터 스펙트럼 영상을 얻는다. 이 스펙트럼 영상에서 가로 좌표에 대해서 두드러지게 스펙트럼 특징을 보이는 파장의 peak 값을 샘플 값으로 취하고 이 샘플 값들을 이용해 Polynomial fitting을 하여 카메라 센서 가로 좌표의 모든 화소에 대한 파장 값을 추출해낸다.

Table 1. 구현된 초분광 분해기의 사양

	VNIR	SWIR
대역	400nm～900nm	900nm～1700nm
밴드수	120bands	120bands
분해능	4.16nm/band	6.66nm/band
해상도	640×640	320×320

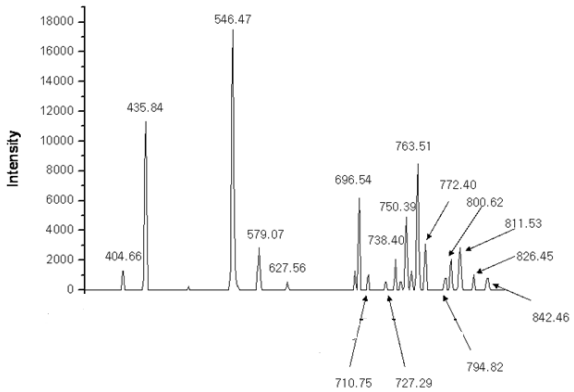


Fig. 6. 수은-아르곤 램프의 주파수 특성

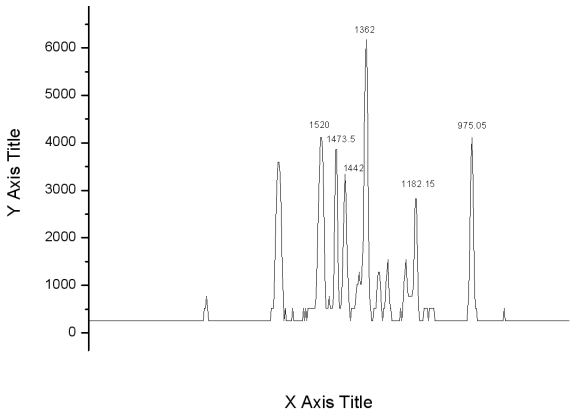


Fig. 7. 크립톤 램프의 주파수 특성

Fig. 8과 Fig. 9는 MFC(Microsoft Foundation Class Library) 기반으로 구현된 파장 미세 보정 프로그램에서 각각 수은-아르곤 광원 램프와 크립톤 광원 램프를 이용하여 얻은 초분광 분해기의 실제 스펙트럼 데이터 영상들이다. 그림 하단부에는 데이터의 스펙트럼 곡선과 Peak의 밝기 값이 가장 큰 10개의 Peak들의 위치를 나타나 있다.

데이터의 스펙트럼 곡선에서 Peak들의 위치 즉 첨점의 위치를 찾기 위해서 곡선의 미분 값을 이용하였다. 먼저 i 째 공간 좌표와 n 째 파장 좌표에서의 밝기 값 S, 즉 스펙트럼 곡선은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S=f_i(n) \tag{1}$$

그리고 스펙트럼 곡선의 미분은 다음과 같이 정의한다.

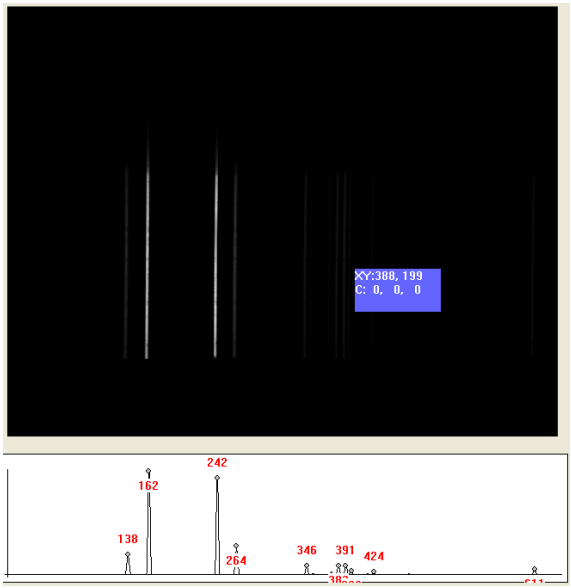


Fig. 8. 아르곤-수은 광원 램프를 통해 얻어진 스펙트럼 데이터와 첨점의 위치

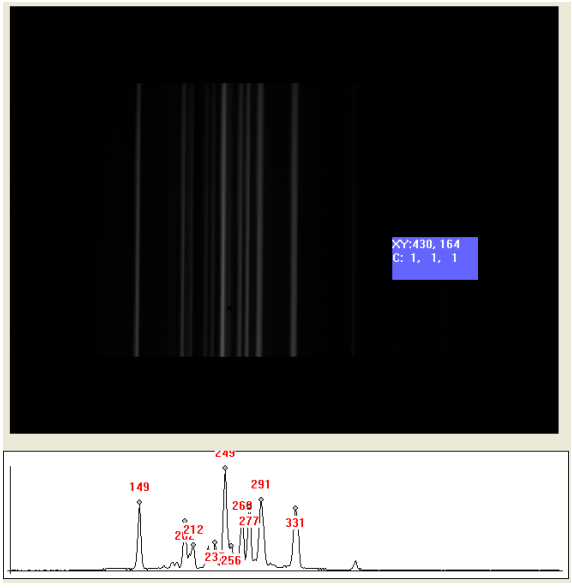


Fig. 9. 크립톤 광원 램프를 통해 얻어진 스펙트럼 데이터와 첨점의 위치

$$\nabla f_i(n) = f_i(n+1) - f_i(n) \tag{2}$$

첨점은 곡선의 미분 값이 양의 값에서 음의 값으로 바뀌는 지점이기 때문에 파장 화소 위치 n이 첨점이

될 때의 조건은 다음과 같다.

$$\nabla f_i(n) \geq 0,\ \nabla f_i(n+1) < 0 \tag{3}$$

위의 첨점 조건을 만족시키는 Peak 중에서 밝기 값이 가장 큰 10개의 첨점의 화소 값을 Fig. 6과 Fig 7의 수은-아르곤 광원 램프와 크립톤 광원 램프의 주파수 특성 스펙트럼의 파장 값과 매핑하여 샘플 값들을 얻는다. 이 샘플 값들을 이용하여 가로 좌표의 모든 화소에 대한 파장 값이 얻어질 수 있도록 Pseudo inverse를 이용한 Polynomial fitting을 수행한다. X는 파장 값을, y는 화소위치라고 한다면 파장 값에 대한 화소 위치의 Polynomial fitting 곡선을 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$y = a_n X^n + a_{n-1} X^{n-1} + a_{n-2} X^{n-2} \cdots + a_1 X^1 + a_0 \tag{4}$$

여기에 앞에서 구했던 샘플 값들을 Polynomial fitting 곡선에 대입하여 아래와 같은 벡터 형태로 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{K-1} \\ y_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^n & X_1^{n-1} & \cdots & X_1^1 & X_1^0 \\ X_2^n & X_2^{n-1} & \cdots & X_2^1 & X_2^0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{K-1}^n & X_{K-1}^{n-1} & \cdots & X_{K-1}^1 & X_{K-1}^0 \\ X_K^n & X_K^{n-1} & \cdots & X_K^1 & X_K^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n \\ a_{n-1} \\ \vdots \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix}$$

이를 Pseudo inverse를 이용하여 Polynomial fitting 곡선의 계수 값 벡터 **a**를 구한다. 여기서 $\mathbf{X^{-1}}$는 **X**의 Pseudo inverse이다.

$$\mathbf{a} = \mathbf{X^{-1}y} \tag{5}$$

이렇게 벡터 **a**를 구함으로써 우리는 원하는 파장 값이 카메라 CCD 센서의 어디 점에 위치하는지 정확하게 알 수 있게 된다. 이를 통하여 VNIR 대역은 4.16nm/band 분해능을, SWIR 대역은 6.66nm/band 분해능을 갖는 각각 120band의 초분광 영상들을 얻을 수 있다.

파장 미세 보정 과정을 거쳐 나온 영상들은 시간에 따른 밝기 변화나 전기적 간섭으로 인한 노이즈와 Bad pixel 및 카메라 ADC(Analog-to-Digital Converter)의 Gain 값의 차이에 따른 노이즈의 영향을 받는다.

시간에 대해 매번 변하는 랜덤 노이즈는 Wavelet thresholding 기법 및 MNF(Maximum Noise Fraction) 기법을 사용하여 제거할 수 있으며 해링본 노이즈와 같은 패턴 노이즈는 Wiener filter 알고리즘 등을 적용하여 제거 가능하다. 또한 카메라 ADC에 의해 영역별로 밝기 값이 다른 것은 Gain 값을 조정하고 Bad pixel에 의한 노이즈는 선형보간법 알고리즘을 사용하여 제거한다[7~10].

4. 초분광 영상의 응용

VNIR 및 SWIR 대역 초분광 분해기를 통해 얻어진 3차원 영상들은 물체 고유의 주파수 특성 정보를 보함하고 있다. 이번 장에서는 물체의 주파수 특성을 이용한 초분광 영상의 응용 예제에 대해서 살펴보도록 하겠다.

Fig. 10의 왼쪽 영상은 할로겐 조명 아래서 촬영된 청동 조형물이다. 이 청동 조형물의 우측 부분을 가열한 후 암실에서 SWIR 대역 초분광 분해기로 촬영을 하면 오른쪽 영상과 같이 43 밴드(1200nm) 영상에서 뜨겁게 달궈진 부분만 보이는 것을 확인 할 수 있다. 이는 SWIR 대역의 열 감지 특성을 보여주는 것이다.

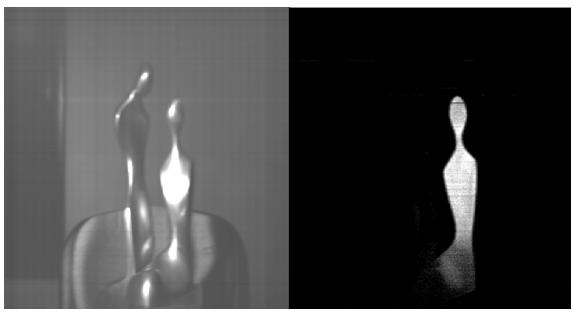


Fig. 10. SWIR 대역 초분광 분해기의 응용(열 감지) - 좌 : 할로겐 조명 아래서 촬영된 영상, 우 : 암실 촬영 후 1200nm 대역의 영상

또한 실리콘 웨이퍼가 1100nm 이상 대역에서 투과되는 것을 SWIR 대역 초분광 분해기를 통해서 확인할 수 있다. Fig. 11의 왼쪽은 가시광 카메라로 촬영한 영상이고 오른쪽은 SWIR 대역 초분광 분해기로 촬영된 60 밴드(1310nm) 영상이다. 가시광 카메라로는 보였던 실리콘 웨이퍼가 SWIR의 특정 대역에서

빛을 투과시켜 뒤쪽 패턴 그림이 찍히는 현상을 보여준다.

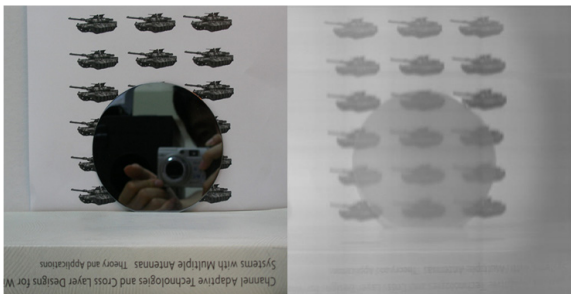


Fig. 11. SWIR 대역 초분광 분해기의 응용(투과성) – 좌 : 가시광 카메라 영상, 우 : 1310nm 대역의 영상

Fig. 12는 조화와 생화가 함께 섞여 있는 꽃병을 VNIR 대역 초분광 분해기로 촬영을 한 후 CMF(Color Matching Function, 색일치함수) 영상 표현 기법[10]을 적용한 영상이다. 그림 오른쪽의 주파수 특성 그래프로 확인할 수 있듯이 색깔이 다른 꽃뿐만 아니라 색깔이 같은 조화와 생화 또한 서로의 주파수 특성이 다름을 알 수 있다. 이를 이용해서 Fig. 12와 같이 빨간 생화만을 구별해 낼 수도 있다.

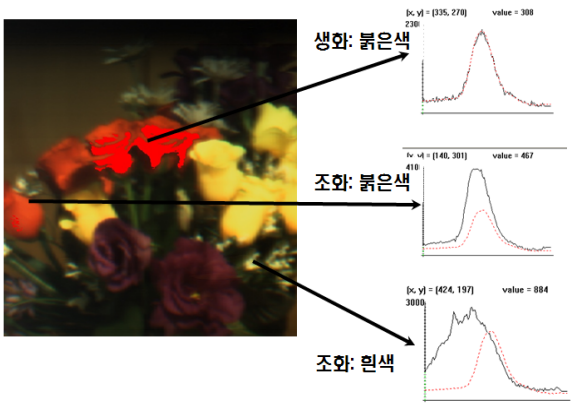


Fig. 12. 가시광 대역 초분광 분해기의 응용 – 스펙트럼 특징을 이용한 생화와 조화의 구분

이렇게 초분광 분해기로 얻어진 물체의 주파수 특성을 분석하여 위장된 적을 탐지하거나 위조지폐 등을 검출하는 표적 추출 분야에 응용될 수 있으며 환경조사, 자원 탐사, 농업 분야에서 사용가능하다.

5. 결 론

초분광 분해기는 2차원 공간의 영상 정보와 각 화소의 파장 정보를 동시에 획득하여 3차원의 데이터를 얻을 수 있는 장치이다. 이는 입사되는 빛을 분광시켜 영상의 각 화소에 대한 스펙트럼을 측정하는 전자 광학 센서로서 물질마다 가지고 있는 고유의 광학적 성질을 이용한 것이다.

초분광 기술은 세 가지 부분으로 나누어진다. 빛을 파장 대역 별로 분해하는 광학부, 카메라 CCD에 맺힌 상을 추출하는 영상 획득부, 그리고 획득된 영상을 가공 및 처리하는 영상 처리부로 구분된다.

우리는 VNIR 대역과 SWIR 대역의 초분광 영상을 얻기 위한 광학부와 영상 획득부를 설계 및 제작 하였으며 영상 획득 후 파장 미세 보정을 통해 얻어진 3차원 영상 데이터를 가공 분석하는 기법에 대해서 연구를 수행하였다. 또한 초분광 분해기를 통해서 얻어진 초분광 영상에 대한 파장별 특성을 분석하고 여러 가지 예제를 통해서 초분광 분해기의 응용분야에 대해서 살펴보았다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 영상정보특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.(계약번호 UD070007AD)

References

[1] M. R. Descour and E. L. Dereniak, “Nonscanning No-moving-parts Imaging Spectrometer”, Proceedings of SPIE, Vol. 2480, pp. 48～64, 1995.

[2] G. Healey and D. Slater, “Models and Methods for Automated Material Identification in Hyperspectral Imagery Acquired Under Unknown Illumination and Atmospheric Conditions”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37, No. 6, pp. 2706～2717, 1999.

[3] D. Manolakis and G. Shaw, “Detection Algorithms for Hyperspectral Imaging Applications”, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 19, No. 1, pp. 29～43,

2002.

[4] Z. Pan. G. Healay, M. Prased, and B. Tromberg, “Face Recognition in Hyperspectral Images”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, No. 12, pp. 1552～1560, 2003.

[5] G. Shaw and H. K. Burke, “Spectral Imaging for Remote Sensing”, Lincoln Laboratory Journal, Vol. 14, No. 1, pp. 3～28, 2003.

[6] 허아영, 최승원, 이재훈 박동조, “초분광 분해기 파장 미세 보정 및 영상의 응용”, 한국군사과학기술학회 종합학술대회, pp. 1047～1050, 2009. 8.

[7] C. Cordon, “A Generalization of the Maximum Noise Fraction Transform”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 1, pp. 608～610, 2000.

[8] A. A. Green, M. Berman, P. Switzer, and M. D. Craig, “A Transformation for Ordering Multispectral Data in Term of Image Quality with Implications for Noise Removal”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 26, No. 1, pp. 65～74, 1988.

[9] E. M. Edwin, “Mitigating the Effects of Bad and Noisy Detectors on Hyperspectral Data”, IEEE International Geoscience and Romote Sensing Symposium, Vol. 1, pp. 80～82, 2003.

[10] 김준태, 허아영, 박동조, “초분광 영상의 노이즈 제거 및 영상 처리 기법 연구”, 제20회 영상 처리 및 이해에 관한 워크샵, 2008.