

단일 렌즈 다중분광 카메라 개발 및 초점 문제 해결 연구

조 두 희 *

하 동 환 **

* 중앙대학교 첨단영상대학원 연구원

** 중앙대학교 예술공학대학 교수

Development of a Single-Lens Multispectral Camera and Study of Focus Issues

Cho, Do Hee *

Har, Dong Hwan **

* Researcher, Graduate School of Advanced Imaging Science ,Chung-Ang University

** Professor, College of Art&Techonology ,Chung-Ang University

본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2024년도 문화체육관광 연구개발사업으로 수행되었음(과제명 :
생성형 AI 및 클라우드 기반 콘텐츠 제작 R&D 인재 양성, 과제번호: RS-2024-00352578, 기여율: 100%)

** Corresponding Author : Har, Dong Hwan dhhar@cau.ac.kr

THE KOREAN SOCIETY OF SCIENCE & ART

한국과학예술융합학회

THE KOREAN SOCIETY OF SCIENCE & ART Vol.42(4)_Regular article or full paper

* Contribution : 2024.08.20_Examination : 2024.09.04_Revision : 2024.09.21_Publication decision : 2024.09.30

목차

Abstract

국문초록

I. 서론

1.1 연구 목적

2.1 연구 방법

II. 본론

2.1 사용 다중분광 카메라의 광학적 특성 및 각 채널의 흐림 정도 비교

2.2 푸리에 변환(Fourier Transform)을 이용한 주파수 스펙트럼 혼합

III. 분석

3.1 촬영 이미지로부터 근적외선, 자외선A 이미지 개선, 효과검증

IV. 결론

Reference

Endnote

Abstract

The aim of this study is to improve a single-lens multispectral camera capable of capturing infrared, ultraviolet, and parts of the visible light spectrum simultaneously. The process of receiving multiple wavelength ranges through a single optical lens often results in various optical aberrations and blurring of the focus. To address this, Fourier transformation was used to separate and mix frequencies for improvement. Additionally, by refining spectral filters and developing variable spectral lighting, a stable shooting environment was established, allowing for the acquisition of near-infrared and UVA images with improved focus in the non-visible light regions.

국문초록

본 연구는 적외선, 자외선, 그리고 가시광선의 일부를 동시에 촬영할 수 있는 단일 렌즈 다중 분광 카메라를 개선하는 것을 목표로 한다. 여러 범위의 파장을 단일 광학 렌즈로 받아들이는 과정에서 다양한 광학 수차가 발생하고, 초점이 흐려지기 마련이다. 이를 개선하기 위해 푸리에 변환을 이용하여 주파수를 분리하고 혼합하여 개선하였다. 또한, 분광 필터의 정교화와 가변 분광 조명의 개발로 안정적인 촬영 환경을 구축하였으며, 비가시광선 영역의 초점 문제를 개선하여 근적외선 및 자외선A 이미지를 얻을 수 있었다.

Key Words

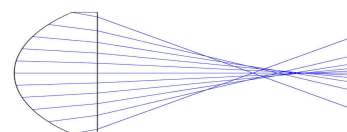
Near Infrared Image(근적외선 이미지), Ultraviolet A Image(자외선A 이미지), Single-lens Multispectral Camera (단일 렌즈 다중분광 카메라), Fourier Transform(푸리에 변환), Spectroscopic Filter Fusion (분광 필터 융합)

I. 서론

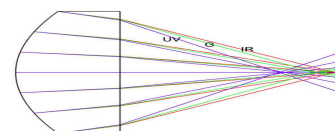
1.1 연구 목적

일반 디지털 카메라의 센서는 근적외선(Near Infrared, NIR)과 자외선A(Ultraviolet A, UVA) 영역에도 반응할 수 있기 때문에, 적절한 광학 장치의 조정을 통해 이들 파장 영역을 촬영할 수 있다. 그러나 이러한 파장은 가시광선 범위를 벗어나므로, 렌즈의 구면수차로 인해 피사체가 흐릿하게 촬영될 가능성이 높다. 또한, 근적외선 및 자외선A 이미지를 동시에 촬영할 경우 색수차가 발생해 이미지의 흐릿함이 더욱 심화된다. <그림-01>은 특정 파장에 대해 부정확하게 설계된 렌즈에서 발생하는 구면수차를 나타내며, <그림-02>는 파장에 따라 달라지는 렌즈의 굴절률로 인한 색수차의 특성을 보여준다.

이러한 광학적 결함은 피사체의 정확한 형태를 파악하는 데 어려움을 초래하며, 다양한 분광 정보를 효과적으로 획득하는 데 장애가 된다. 본 연구의 목적은 단일 렌즈 다중분광 카메라(Single-Lens Multispectral Camera)의 한계인 비가시광선 이미지의 초점 문제를 해결하기 위해, 새로운 카메라와 조명 개발, 후처리 방법 제시 등 융합적 접근을 통해 근적외선 및 자외선A 이미지의 초점을 명확하게 재현하는 방법을 제시하는 데 있다.



<그림-01> 파장의 구면수차



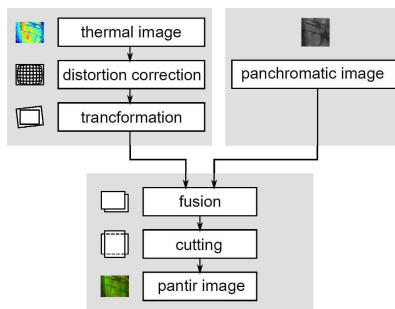
<그림-02> 파장별 색수차

1.2 연구 방법

다중분광 카메라는 빛의 파장을 선택적으로 획득함으로써 피사체에 대한 보다 구체적인 정보를 얻고, 이를 다양한 목적에 맞게 활용할 수 있다. 예를 들어, 스마트 농업 분야에서는 NIR (770-810 nm), Red Edge (730-740 nm), Red (640-680 nm) 파장대의 이미지를 촬영하여 이들 간의 비율을 계산함으로써 농작물의 영양 상태나 수분 결핍 등을 추정하고, 이를 통해 생산성 향상에 기여할 수 있다¹⁾. 또한, 국방과학 분야에서는 대공 유도 미사일 카메라가 열영상과 자외선 이미지를 동시에 취득하여 목표 항공기와 회피용 플레어를 구분함으로써 명중률을 높이는 데 사용된다²⁾.

이처럼 다중분광 카메라는 여러 분광 영역을 기록하기 위해 다수의 카메라를 사용하거나, 분광 필터를 회전 또는 교체하는 방식을 사용한다. 그러나 다수의 카메라를 사용하는 경우 두 개 이상의 시차가 발생하고, 복잡한 정합 과정을 거쳐도 완벽한 결과를 얻을 수 없다. 또한, 여러 개의 분광 필터를 교체하며 촬영하는 방법은 카메라를 한 대만 사용하기 때문에 시차 문제는 없지만 필터 교체 과정에서 시간차가 발생하기 때문에 피사체가 움직일 경우 분석이 불가능하다.

<그림-03>은 두 개의 시차를 정합하기 위한 과정을 도식화한 것이며³⁾, <그림-04>는 움직이는 피사체를 필터 회전 및 교체 방식으로 촬영한 결과로 분석의 어려움을 보여준다.



<그림-03> 시차 문제 해결을 위한 이미지 정합 과정

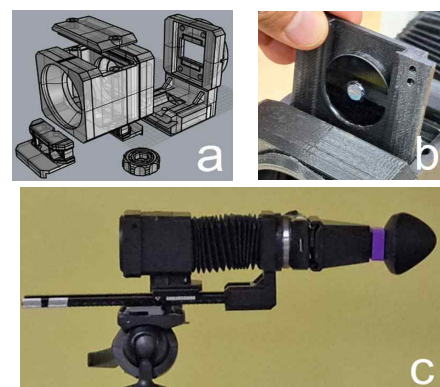


<그림-04> 필터 교체식 카메라의 시간차 문제

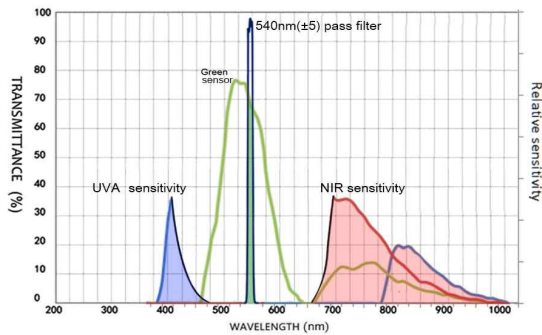
이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 기존 다중분광 카메라의 단점을 보완한 새로운 카메라와 이미지 정합 시스템을 제안한다. 이 카메라는 렌즈의 제2주점에 특수 제작된 필터를 장착하여, 근적외선, 자외선A, 그리고 일부 녹색 파장을 시차 없이 동시에 촬영할 수 있도록 설계되었다⁴⁾. 하지만 모든 파장이 하나의 렌즈 광학계를 공유하기 때문에, 녹색을 제외한 근적외선 및 자외선A 이미지에서 구면수차와 색수차가 발생하여 정확한 초점을 맞추기 어려운 단점이 존재한다. <그림-05>는 이러한 문제를 보여주고 있으며, <그림-06>은 앞서 제작한 카메라의 디자인과 필터 삽입 과정을 설명하고, <그림-07>은 카메라의 분광 감도 특성을 그래프로 나타낸다.



<그림-05> 각 이미지의 흐림 정도



<그림-06> 기존 다중분광 카메라



<그림-07> 기존 카메라의 분광 감도 특성

다음 연구 과정은 하나의 렌즈로 여러 분광 영역을 동시에 촬영하는 장점을 유지하면서, 비가시광선 이미지의 흐림 현상을 개선하고 분광 영역 정밀화를 달성하기 위한 구체적인 단계이다.

- 분광 영역 조절을 위한 필터 및 카메라 제작.
- 각 분광 이미지의 노출 비율 조절을 위한 가변 조명 제작.
- 각 분광 이미지를 푸리에 변환을 이용해 주파수 스펙트럼으로 변환.
- 초점이 명확하게 맞는 초록 이미지로부터 고주파수 성분을 차용.
- 근적외선, 자외선A 이미지의 저주파수 성분과 혼합. 역 푸리에 변환으로 이미지 복귀.
- 개선된 근적외선, 자외선A 이미지 평가.

II. 본론

2.1 새로운 다중분광 카메라의 분광 영역 조정 및 각 채널의 흐림 정도 확인

(1) 다중분광 카메라의 분광 영역 조정

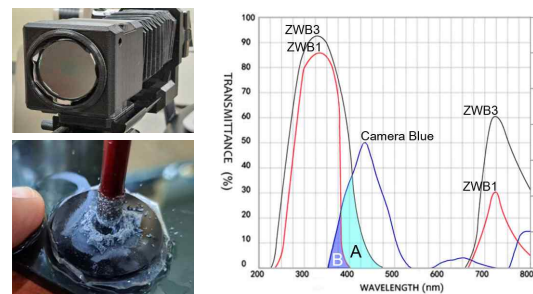
이전 연구에서 사용된 다중분광 카메라는 근적외선 및 자외선A를 투과시키기 위해 ZWB3 필터와 540 nm(± 5) 밴드패스 필터를 사용하였다⁵⁾. 그러나, 자외선 투과 영역에서 약 400 nm에서 470 nm 범위의 일부 가시광선이 함께 촬영되는 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위해, 본 연구에서는 ZWB1 필터를 사용하여 가시광선을 완벽하게 차단할 수 있는 새로운 카메라를 제작하였다.

<그림-08>의 좌측 이미지는 제작된 카메라와 필터 가공의 모습을 나타낸다. <그림-08>의 우측 그래프는 카메라의 분광 감도와 필터 투과율의 비교를 보여주며, Blue 센서의 분광 감도와 기존 ZWB1 필터, 새로운 ZWB3 필터의 투과 영역을 비교한 결과를 제시한다. ZWB3 필터의 감도에 해당하는 A 영역과 비교했을

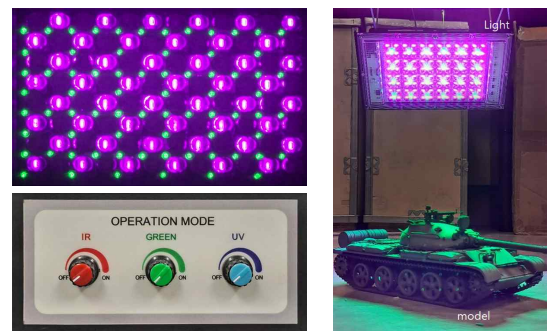
때, ZWB1 필터의 B 영역에서는 감도가 낮으나, 400 nm 이상의 파장을 차단하여 가시광선을 완벽히 차단하는 성능을 확인할 수 있었다.

선정된 ZWB1 필터와 540 nm(± 5) 밴드패스 필터는 동시에 사용할 수 없기 때문에, ZWB1 필터의 중앙부에 구멍을 내고 540 nm 밴드패스 필터를 삽입하는 방법을 통해 근적외선, 자외선A, 그리고 일부 녹색 파장을 동시에 촬영할 수 있도록 하였다. 이 필터의 효과가 화면 전체에 균일하게 반영될 수 있도록 렌즈 내부의 조리개를 제거하고 그 자리에 필터를 배치하였다. 이에 따라 노출 조절은 셔터 속도와 카메라 감도를 통해 이루어지며, 조리개는 사용할 수 없다. 촬영된 이미지는 별도의 영상 처리가 필요 없고, Red 채널은 근적외선, Green 채널은 녹색, Blue 채널은 자외선A 이미지가 기록된다.

각 파장 이미지의 노출 비율은 조절할 수 없기 때문에, 자외선이 풍부한 밝은 일광 하에서만 유사한 비율로 촬영이 가능하며, 흐리거나 어두운 환경에서는 노출 비율이 크게 달라진다. 따라서 일관된 촬영을 위해 근적외선, 자외선A, 녹색 LED로 구성된 조명을 제작하여 사용하였다. <그림-09>는 이 조명을 통해 필터의 분광 투과 특성에 맞추어 노출 비율을 조절하는 모습을 보여준다.



<그림-08> 카메라 및 필터 개발, 분광 감도 특성 차이

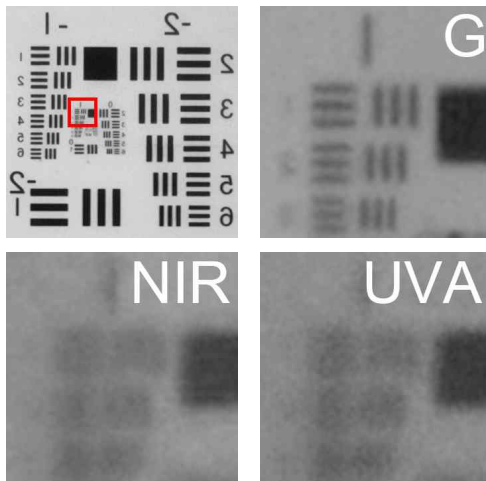


<그림-09> 분광 비율 가변 조명 개발

(2) 근적외선 및 자외선A 이미지의 흐림 정도

540 nm 밴드패스 필터가 렌즈 중앙에 위치하여 생성된 녹색 이미지는 피사체 심도가 넓게 나타난다. 반면, 근적외선 및 자외선A 이미지는 렌즈 주변부에서 들어오는 빛을 사용하기 때문에 피사체 심도가 상대적으로 좁으며, 해상도도 저하된다.

<그림-10>은 각 이미지의 선명도를 비교하기 위해 USAF 1951 타깃을 촬영한 결과로, 중앙 부분을 확대한 모습을 보여준다. 하단에 위치한 근적외선 및 자외선A 이미지는 우측 상단에 있는 녹색 이미지에 비해 더 흐릿해, 선을 명확하게 구분하기 어렵다. 이러한 현상은 렌즈 수차 및 색 수차로 인한 결과이며, 이를 해결하기 위해 녹색 이미지와의 융합 과정을 거친다.



<그림-10> 각 분광 이미지의 흐림 정도 비교

2.2 푸리에 변환(Fourier Transform)을 이용한 주파수 스펙트럼 혼합

(1) 푸리에 변환을 이용한 근적외선 및 자외선A 초점 이미지의 개선 방법

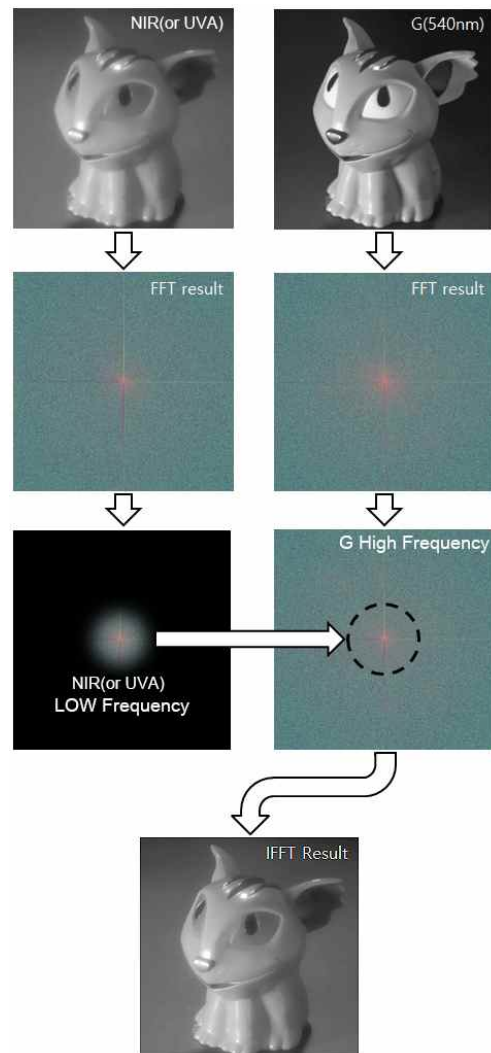
푸리에 변환(Fourier Transform)은 주기적인 파형이 단순한 사인파의 무수한 합으로 표현될 수 있음을 증명한다<그림-11>. 이 개념을 활용하여 이미지를 주파수 스펙트럼으로 변환하여 분석 및 활용할 수 있다. 이를 통해, 녹색 이미지의 고주파수 성분과 근적외선 및 자외선A 이미지의 저주파수 성분을 혼합함으로써, 초점이 정확히 맞는 근적외선 및 자외선A 이미지의 초점을 개선하는 방법에 대한 도식이다.

먼저, 근적외선 및 녹색 이미지를 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 통해 주파수 스펙

트럼으로 변환한다. 그 후, 변환된 근적외선 이미지의 푸리에 스펙트럼에서 중앙부의 저주파 성분을 복사하여, 이를 녹색 이미지의 푸리에 스펙트럼에 붙여넣는다. 다음으로, 반전 고속 푸리에 변환(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)을 적용하여 스펙트럼을 다시 이미지로 변환한다. 이 과정을 통해 녹색 이미지의 고주파수 성분과 근적외선 이미지의 저주파수 성분이 결합하여 새롭게 개선된 근적외선 이미지가 생성된다. 자외선A 이미지의 초점 개선 방법 역시 동일하게 녹색 이미지를 사용하여 적용된다.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N a_n \cos n\omega_0 t + \sum_{n=1}^N b_n \sin n\omega_0 t$$

<그림-11> 푸리에 급수

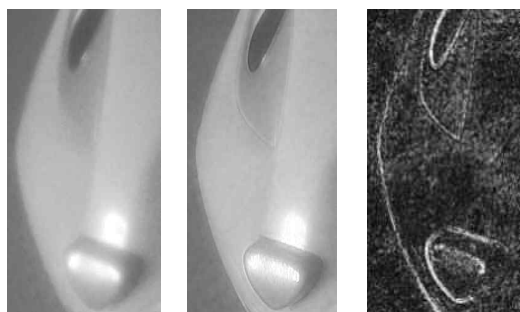


<그림-12> 초점 개선 방법 : 푸리에 변환을 이용한 스펙트럼 혼합

(2) 푸리에 스펙트럼 혼합을 통한 근적외선 및 자외선A 이미지 개선 결과

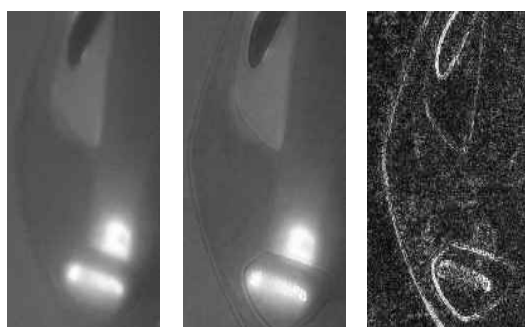
<그림-13>a는 입력된 근적외선 이미지를, <그림-13>b는 푸리에 스펙트럼 혼합을 통해 개선된 근적외선 이미지를 확대하여 보여준다. 또한, <그림-13>c는 입력된 근적외선 이미지와 개선된 근적외선 이미지 간의 차이를 나타낸 결과로, 이를 통해 고주파 성분의 형태가 명확히 나타나 초점이 개선된 영역을 보여준다.

같은 방법으로, <그림-14>a와 <그림-14>b는 자외선 이미지의 개선 전후를 보여주며, <그림-14>c는 그 차이를 나타낸다. 두 경우 모두 초점이 흐린 근적외선, 자외선A 이미지에 대하여 푸리에 스펙트럼 혼합 기법을 적용한 후 초점의 선명도가 크게 개선된 결과를 확인할 수 있다.



a. 입력 이미지 b. 개선 이미지 c. 개선 전,후 차이

<그림-13> 근적외선 이미지의 개선 전,후와 차이



a. 입력 이미지 b. 개선 이미지 c. 개선 전,후 차이

<그림-14> 자외선A 이미지의 개선 전,후와 차이

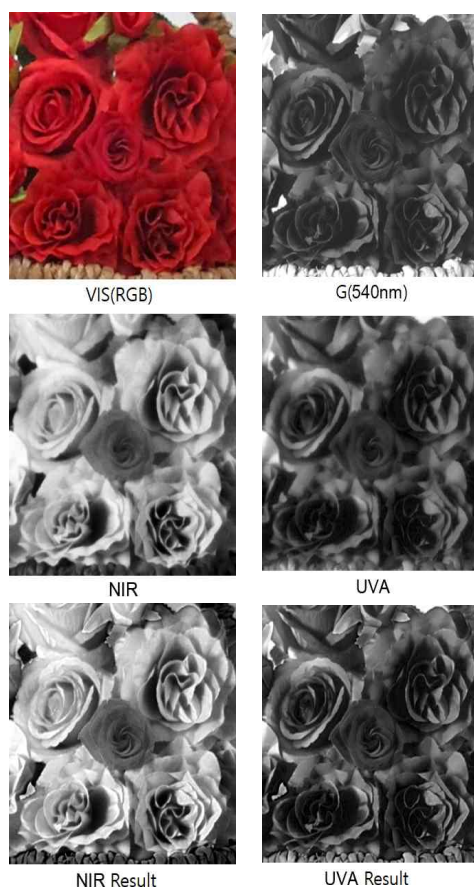
III. 분석

3.1 촬영 이미지로부터 근적외선 및 자외선A 이미지 초점 개선, 효과검증

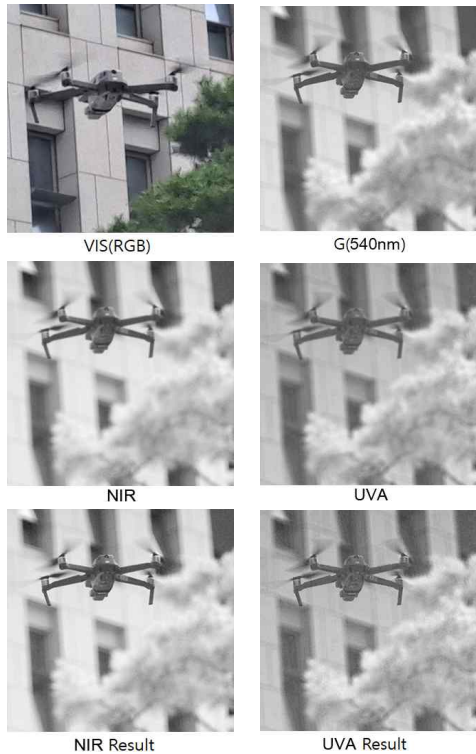
(1) 근적외선 및 자외선A 이미지의 반사 특성 및 흐림 현상 개선 결과.

조화 장미와 생화 장미를 혼합하여 촬영한 후, 해당 이미지를 개선하는 실험을 통해 효과를 검증하였다. <그림-15>는 일반 카메라로 촬영된 컬러 사진과 제작된 분광 카메라로 얻은 녹색, 근적외선 및 자외선A 이미지를 확인할 수 있다. 또한, 제시된 방법에 의해 개선된 근적외선 및 자외선A 이미지도 함께 제시되어 있다.

각 이미지에서 중앙부 생화와 주변부 조화의 근적외선 및 자외선A 반사 특성이 명확히 구분되며, <그림-15> 하단 결과에서 흐림 현상이 개선된 것을 시각적으로 확인할 수 있다. 이는 푸리에 스펙트럼 혼합 기법이 녹색 이미지를 활용하여 근적외선 및 자외선A 이미지의 초점을 개선했음을 보여준다.



<그림-15> 생화, 조화 장미 촬영 및 초점 개선 결과



<그림-16> 드론 프로펠러 촬영 및 초점 개선 결과

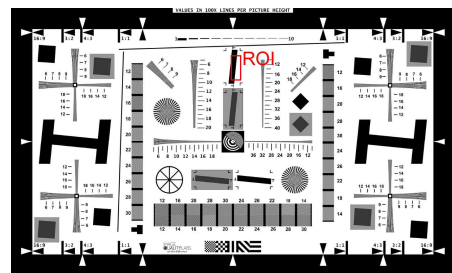
(2) 단일 시차 및 시간차 개선 결과와 흐린 초점 문제 개선 결과.

<그림-16>은 야외에서 드론을 촬영한 사진으로, 연구의 효과를 증명한다. 고속으로 회전하는 드론의 프로펠러 모양이 근적외선, 자외선A, 녹색 이미지에서 동일한 형태로 나타나므로 시간차 없이 동시에 촬영됨을 증명하며, 멀리 있는 배경과 드론의 위치가 세 이미지에서 동일한 위치에 표현됨으로 단일 시차임이 증명된다. 또한, <그림-16> 하단의 근적외선, 자외선A 개선 결과를 통해, 시차와 시간차로 인한 왜곡이 제거된 상태에서 초점이 개선된 결과를 확인할 수 있다.

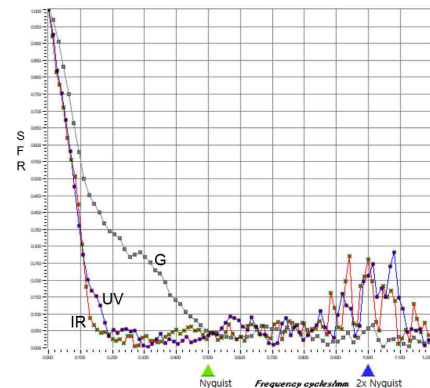
(3) SFR 분석을 통한 주파수 분해 능력 평가.

앞서 촬영 결과를 통하여 초점이 개선됨을 시각적으로 확인할 수 있었으며, 객관적 수치로 표현하기 위하여 ISO12233 기반 SFR(Spatial Frequency Response) 측정법을 사용하였다. 이를 위해 ISO12233 표준 타깃을 규정에 맞게 촬영하였다⁶⁾. <그림-17>은 ISO12233 표준 타깃을 보여주며, 붉은색으로 표시된 ROI(Region of Interest)는 SFR 해상도 측정에 사용된다. 측정 프로그램은 I3a(International Imaging Industry Association)결과에서 제공하는 SFRwin을 사용하며 그래프 형태로 분석이 나온다. 분석 절차는 초점 개선 전, 후 이미지를 각각 측정하여 그래프로 만들고 비교함으로써 차이를 확인한다.

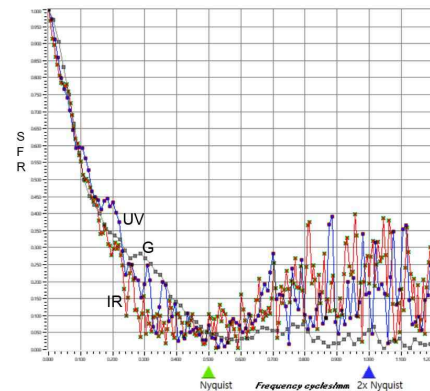
<그림-18>은 초점 개선 전 이미지에 대한 SFR 결과로 녹색 이미지 그래프에 비해 근적외선과 자외선A 그래프가 가파름을 볼 수 있다. 이것은 초점을 판단하는 주파수를 분해능이 떨어져 상대적으로 초점이 흐려짐을 나타낸다. 반대로 <그림-19>는 초점 개선 후 이미지에 대한 SFR 결과로, 근적외선 및 자외선A 이미지 그래프가 녹색 이미지 그래프와 상대적으로 유사한 형태로 바뀐 것을 확인할 수 있다. 이것은 주파수 분해능이 녹색 이미지와 유사해짐을 나타내며, 제안된 방법이 근적외선 및 자외선A 이미지의 초점이 효과적으로 향상되었음을 나타낸다.



<그림-17> ISO12233 테스트 타깃



<그림-18> 개선 전 각 파장 이미지의 SFR특성



<그림-19> 개선 후 각 파장 이미지의 SFR특성

IV. 결론

본 연구는 단일 렌즈를 사용하여 근적외선, 자외선 A 및 일부 가시광선을 동시에 받아들일 수 있는 다중 분광 카메라를 개발하여, 시차 및 시간차 없이 기록할 수 있게 하였다. 이 과정에서 하나의 광학계로 넓은 분광 영역을 수용하기 위해 카메라 광학 필터의 정교화와 흐림 현상의 개선 방법을 제안하였다. 연구의 주요 성과는 다음과 같다:

정교화된 다중분광 카메라 개발 및 분광 비율 가변 조명 개발: 분광 영역을 정밀화한 다중분광 카메라를 개발하고, 각 분광 이미지의 노출을 일치시키기 위해 특수 제작한 광학 필터를 사용하였다. 또한, 분광 비율을 가변할 수 있는 조명을 개발하여 안정적인 촬영 환경을 구축하였다.

흐림 현상 개선: 녹색 이미지의 고주파수 성분과 근적외선, 혹은 자외선A 이미지의 저주파수 성분을 혼합하여 흐림 현상을 개선하였다. 이를 통해 보다 선명한 근적외선 및 자외선A 이미지를 생성할 수 있었다.

효과 검증: 다양한 환경에서 테스트 촬영을 진행하여, 제안된 방법으로 초점이 개선된 정도를 시각적으로 검증하였다. 또한, ISO12233과 SFR 분석을 통해 주파수 분해능 특성을 그래프로 나타내어, 개선 정도를 수치로 평가하였다. 분석 결과, 근적외선 및 자외선 A 이미지의 주파수 분해능이 향상되어 녹색 이미지의 그래프와 유사한 수준으로 개선되어 초점 정확도가 향상된 근거를 확인할 수 있었다.

본 연구의 결과, 단일 광학계를 사용하는 다중분광 카메라에서 발생하는 이미지 흐림 문제를 제안된 방법으로 해결하고, 초점 문제를 효과적으로 개선할 수 있음을 증명하였다. 이 방법은 다중 파장 영역을 동시에 촬영할 수 있는 단일 렌즈 다중 분광 카메라의 성능을 크게 향상시켰다는 점에서 중요한 의의를 가진다. 특히, 푸리에 변환을 활용한 주파수 분리 및 혼합 기술은 광학 수차와 초점 문제를 해결하는 새로운 방법으로, 분광 필터의 정교화와 가변 분광 조명을 활용하여 다양한 산업 및 연구 분야에서 비가시광선 이미징의 정확도와 신뢰성을 높일 수 있다. 이러한 개선은 생명 과학, 재료 공학, 보안 및 감시 등 여러 분야에서 응용을 기대하게 한다.

Reference

- [1] Cho, D. H., Har, D. H., "Development of an Invisible Light Multispectral Area Acquisition Camera", The Korea Society of Science & Art, 41(5), pp.429-437, 2023.
- [2] Daniel, S. J., Seung Hwan, B., Shinyoung, Y., Qiang, F., Xiong, D., Wolfgang, H., Min, H. K., "Compact Snapshot Hyperspectral Imaging with Diffracted Rotation", ACM Trans. Graph., 38(4), 2019.
- [3] Freedman, B. M., Earley, R. V., Balakrishnan, T. P., "Digital Ultraviolet Reflectance Photography Can Be Used to Quantify Improvements in Photodamage", Journal of Cosmetic Dermatology, 25(3), 2005.
- [4] Haque, T., Crowther, J. M., Lane, M. E., Moore, D. J., "UV Filters in Barrier Mimetic Formulations Localize in the Outer Stratum Corneum", WCD Poster, 27(1), 2015.
- [5] Helfer, G. A., Barbosa, J. L. V., Alves, D., Costa, A. B., Beko, M., Leithardt, V. R. Q., "Multispectral Cameras and Machine Learning Integrated into Portable Devices as Clay Prediction Technology", Journal of Sensor and Actuator Networks, 10(3), 2021.
- [6] Hines, J., Wang, E., "Multispectral Thermal Imaging with a LWIR+ VIS Camera (Master's thesis)", Stanford University, pp.15-16, 2019.
- [7] International Organization for Standardization Technical Committee, 「ISO 12233 Photography - Electronic Still-Picture Camera - Resolution Measurements(2)」, International Organization for Standardization, pp.133-178, 2005.
- [8] Jonathan Crowther, "Lens Transmission Measurement in the UV", JMC Scientific Consulting, 2023.
- [9] Kim, T., Lee, K., Baek, N., Chae, H., Lee, S., "Aperture-Encoded Snapshot Hyperspectral Imaging with a Lensless Camera", APL Photonics, 7(3), 2023.
- [10] Klaas, P., "Applying Conventional Vegetation Vigor Indices to UAS-Derived Orthomosaics: Issues and Considerations", ICPA, 2014.
- [11] Langford, M., 「Langford's Advanced Photography」, Oxford: Elsevier Science Ltd., 2008.
- [12] Milthorpe, J. F., Lynn, P. J. P., "Effect of Aerodynamic Heating on Infrared Guided Missiles", Shock Waves, 20(4), pp. 345-359, Springer, 2010.
- [13] Monakhova, K., Yanny, K., Aggarwal, N., Waller, L., "Spectral DiffuserCam: Lensless Snapshot

Hyperspectral Imaging with a Spectral Filter Array”,
Optica, 7(3), 2020.

- [14] Ray, F., 「Scientific Photography and Applied Imaging」, Focal Press, 2002.
- [15] Seyoung, P., “Compact Snapshot Hyperspectral Imaging with Diffracted Rotation (Master’s thesis)”, University of Suwon, pp.20–21, 2021.
- [16] Weber, I., Jenal, A., Kneer, C., Bongartz, J., “PANTIR – A Dual Camera Setup for Precise Georeferencing and Mosaicing of Thermal Aerial Images”, ISPRS Conference, 40(2), pp. 205–220, 2015.

Endnote

- 1) Helfer, G. A., Barbosa, J. L. V., Alves, D., Costa, A. B., Beko, M., Leithardt, V. R. Q., “Multispectral Cameras and Machine Learning Integrated into Portable Devices as Clay Prediction Technology”, Journal of Sensor and Actuator Networks, 10(3), p.40, 2021.
- 2) Milthorpe, J. F., Lynn, P. J. P., “Effect of Aerodynamic Heating on Infrared Guided Missiles”, Shock Waves, Springer, 20(4), pp.345–359, 2010.
- 3) Weber, I., Jenal, A., Kneer, C., Bongartz, J., “PANTIR – A Dual Camera Setup for Precise Georeferencing and Mosaicing of Thermal Aerial Images”, ISPRS Conference, 40(2), pp.205–220, 2015.
- 4) Cho, D. H., Har, D. H., “Development of an Invisible Light Multispectral Area Acquisition Camera”, The Korea Society of Science & Art, 41(5), pp.429–437, 2023.
- 5) Cho, D. H., Har, D. H., “Development of an Invisible Light Multispectral Area Acquisition Camera”, The Korea Society of Science & Art, 41(5), pp.429–437, 2023.
- 6) International Organization for Standardization Technical Committee, 「ISO 12233 Photography – Electronic Still-Picture Camera – Resolution Measurements(2)」, International Organization for Standardization, pp.133–178, 2005.