

비가시광선 다중분광영역 취득 카메라 개발

조 두 희 *

하 동 환 **

* 중앙대학교 첨단영상대학원 연구원

** 중앙대학교 예술공학대학 교수

Development of an Invisible Light Multispectral Area Acquisition Camera

Cho, Do Hee *

Har, Dong Hwan **

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

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

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

THE KOREAN SOCIETY OF SCIENCE & ART

한국과학예술융합학회

THE KOREAN SOCIETY OF SCIENCE & ART Vol.41(5)_Regular article or full paper

* Contribution : 2023.11.16_Examination : 2023.12.09_Revision : 2023.12.22_Publication decision : 2023.12.30

목차

Abstract

국문초록

I. 서론

1.1 연구 목적

2.1 연구 방법

II. 본론

2.1 적외선 및 자외선 영상을 기록하기 위한 광학 장치 구성

2.2 비가시광선 영상의 가시성을 높이기 위한 장치

2.3 촬영 영상으로부터 적외선, 자외선 영상 분리 방법, 효과 검증

III. 결론

Reference

Endnote

Abstract

General CCD and CMOS sensors used to photograph visible light can record some near-infrared and ultraviolet areas, so the optical device is adjusted according to the purpose to make a camera specialized for a specific wavelength. However, it is made to be specialized in either infrared or ultraviolet rays due to differences in optical properties and is not used at the same time. This study presents a special optical device to obtain infrared and ultraviolet images at the same time from an image obtained by a single shot and explains how to separate images.

국문초록

가시광선을 촬영하기 위해 사용되는 일반 CCD, CMOS 센서는 일부 근적외선과 자외선 영역을 기록할 수 있으므로 목적에 따라 광학 장치를 조절하여 특정 파장에 특화된 카메라로 만들어 사용하기도 한다. 그러나 광학적 특성 차이로 적외선, 자외선 중 한쪽에 특화되도록 만들어지며 동시에 사용하지 않는다. 본 연구는 한 번의 촬영으로 얻어진 영상에서 적외선과 자외선영상을 동시에 얻게 하도록 특별한 광학장치를 설명하고 영상 분리 방법을 제시한다.

Key Words

Infrared Image(적외선 이미지), Ultraviolet Image(자외선 이미지), Multi-Spectral Camera(다중분광카메라), Spectroscopic Fusion Camera(분광 융합 카메라)

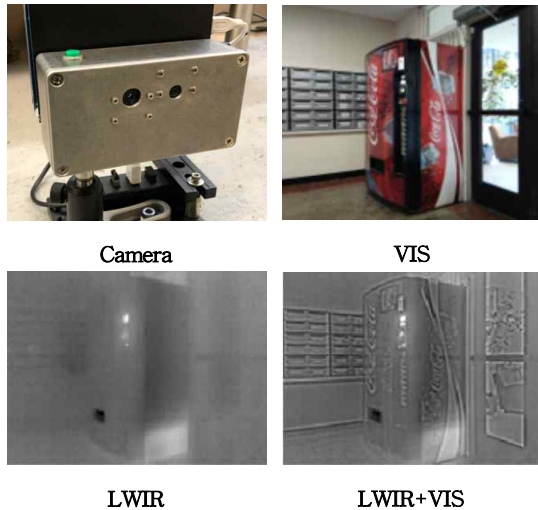
I. 서론

1.1 연구 목적

표준 디지털 카메라는 인간의 시각이 인지할 수 있는 약 400 ~ 700nm 범위의 전자기 스펙트럼에 최적화되어 있으며, 이는 일반적으로 빨간색에서 보라색까지의 색상으로 구분된다. 반면에, 카메라의 CCD 및 CMOS 센서는 훨씬 광범위한 스펙트럼인 350nm에서 1,100nm까지 기록할 능력을 지니고 있으며, 응용 분야에 따라 이 범위로 확장하여 사용하기도 한다. 이 경우 인간이 느끼는 색으로 표현할 수 없기 때문에 카메라 센서의 분광특성에 따라 잘못된 컬러로 표현될 수 있으므로 흑백음영에 맞춰 바꾸어 표현한다. 또한 높은 파장의 적외선 카메라, 또는 낮은 파장의 자외선 카메라로 나뉘게 되는데 목적에 따라 자외선 영상과 적외선 영상이 동시에 필요로 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 목적을 구현하기 위하여 카메라의 광학 장치를 가공, 구성하고 촬영된 한 장의 영상으로부터 자외선 영상과 적외선 영상을 분리하는 방법을 제시하고자 한다.

1.2 연구 방법

다중분광이미징(Multi-spectral Imaging) 기술은 비가시광선의 파장 범위를 선별적으로 기록 및 분석하기 위해 활용되며, 이는 센서가 기록할 수 있는 전체 가시 및 비가시 광선 영역을 포함한다. 해당 기술은 특정한 응용 분야에 맞추어 특정 영역의 파장을 선별하고 조합하여 활용한다. <그림-01>은 LWIR 카메라의 열영상(Long-Wave Infrared) 과 일반 카메라 영상의 엮기 영역을 혼합하여 가시성을 높인 결과를 보여준다.¹⁾ <그림-02>는 640~680nm의 가시광선 영역과 770~810nm의 근적외선 영역 영상을 이용하여 식물의 성장 상태를 파악하기 위한 분석 결과를 보여준다.²⁾ 이 기술들은 촬영 대상이 방출하는 파장을 선별적으로 가시화하여 대상의 특성 이해에 기여하지만, 두 개 이상의 카메라를 사용할 때 발생하는 광학적 시각차 문제가 있다.



<그림-01> 가시성을 높인 열영상



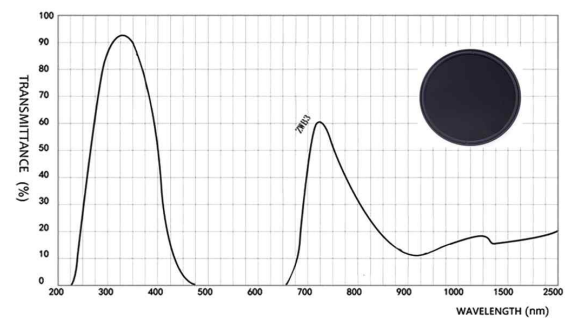
<그림-02> 식물의 성장 상태 분석

단일 렌즈를 사용하여 다중분광 영역을 기록하는 방법으로는 광축분할 카메라와 필터 교체식 카메라가 있다. 광축분할 카메라는 하프미러나 프리즘을 활용해 단일 렌즈로부터 들어오는 영상을 분광감도가 다른 센서에 기록하며, 필터 교체식 카메라는 카메라의 필터를 교체하여 촬영함으로써 분광 영역을 구분한다. 이 방식들은 하나의 광축을 사용하여 시각차 문제를 해결하지만, 복잡한 광학 구조나 필터 교체에 따른 시간 차이 문제를 안고 있다. 본 연구는 자외선 및 적외선 이미지를 동시에 촬영하고 분리할 수 있는 일반 카메라 시스템의 활용 방안을 제시함으로써 이러한 문제들을 해결하고자 한다. 연구 과정은 다음과 같다:

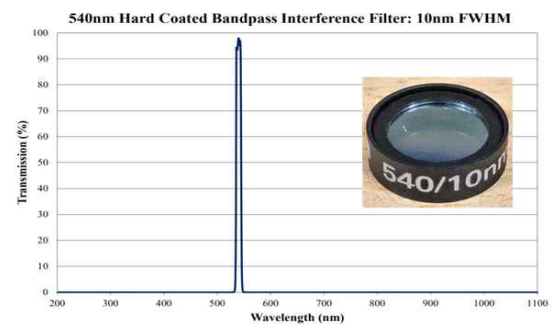
- 적외선 및 자외선 영상을 기록하기 위한 광학장치 구성.
- 비가시광선 가시성 향상을 위한 필터 가공.
- 촬영 영상으로부터 적외선, 자외선 영상 분리과 효과 검증.

실험을 위해 디지털 카메라의 적외선 차단 필터를 제거하고, CMOS 센서가 기록할 수 있는 전체 파장 범위를 기록할 수 있도록 조정하였다. 자외선 및 적외

선 영역의 투과를 가능하게 하는 ZWB3 필터와 가시성을 높이기 위해 540nm(± 5) 밴드패스 필터를 사용하였다. BW 093 IR 830 적외선 필터와 BAADER-U 자외선 필터를 비교 기준으로 설정하여 효과 검증을 수행하였다. <그림-03>은 ZWB3 필터의 분광 특성을 보여주며, 325nm의 자외선과 725nm의 적외선 영역을 투과시키는 특성을 나타낸다. <그림-04>는 540nm(± 5) Green 밴드패스 필터의 분광 특성을 보여주며, 이미지의 초점 영역 및 세부 디테일의 개선에 활용한다.



<그림-03> ZWB3 자외선, 적외선 필터



<그림-04> 540nm(± 5) 밴드패스 필터

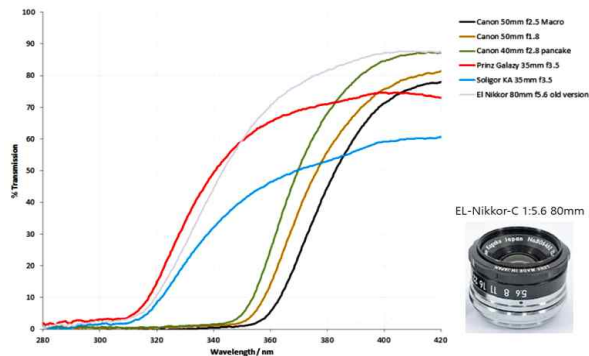
II. 본론

2.1 적외선 및 자외선 영상을 기록하기 위한 광학장치 구성

(1) 자외선 투과를 고려한 렌즈의 선택

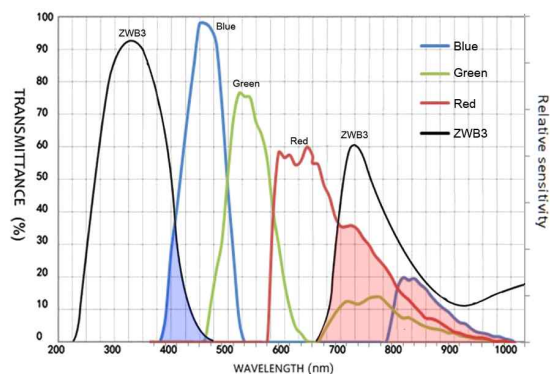
본 연구는 적외선 및 자외선 영상 촬영을 위해 분광 영역을 최대한 넓혀야 하므로 카메라 시스템을 구성하는 모든 요소의 분광 특성이 중요하다. 특히 최근 출시되는 카메라 렌즈들은 자외선 영역이 적외선보다 상대적으로 좁아지고 있어서 자외선 투과율을 고려한 렌즈선택이 중요하다. 다음 <그림-05>는 각종 렌즈들에 대한 자외선 분광투과율을 보여주는 그래프로

EL-Nikkor 80mm 렌즈가 가장 넓은 영역의 파장을 투과함을 확인할 수 있다³⁾. 그러므로 본 연구에서는 이 렌즈를 이용하여 카메라 시스템을 구성한다.



<그림-05> 렌즈별 UV파장 투과도 비교

(2) 카메라의 분광감도 특성에 대한 ZWB3 필터 연구에 사용하는 카메라는 일반 CMOS 센서의 SONY NEX-5 모델이며 핫미러 Hot-mirror를 제거하고 ZWB3 필터를 부착하여 사용한다. <그림-06>은 NEX-5의 핫미러를 제거한 센서의 전체 분광스펙트럼 감도 비율을 보여준다.⁴⁾ 또한 같은 그래프에 ZWB3 필터의 분광 투과율을 함께 표시하여 센서의 감도와 필터 투과 범위의 교집합 부분을 나타내어 카메라가 촬영할 수 있는 스펙트럼 범위를 확인할 수 있게 하였다.

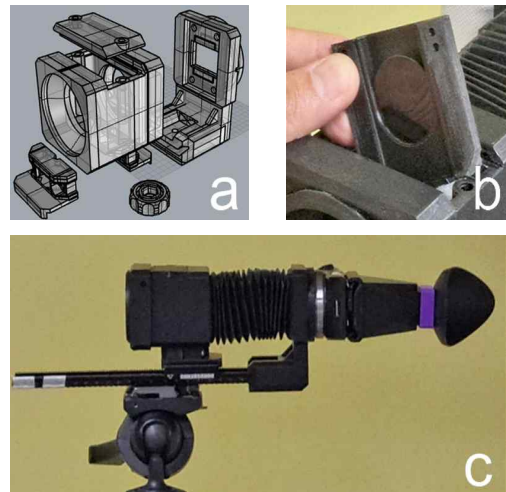


<그림-06> 핫미러를 제거한 NEX-5 카메라의 분광감도와 ZWB3 필터의 분광 투과율

(3) 카메라 구조 제작

앞서 선정한 EL-Nikkor 80mm 렌즈를 NEX-5 카메라에 부착하기 위하여 기구물을 제작하였다<그림-07>. 이것은 렌즈 거치부, 필터 수납부, 모노레일 및 벨로우즈로 구성되어 있으며 NEX-5 카메라를 탈부착

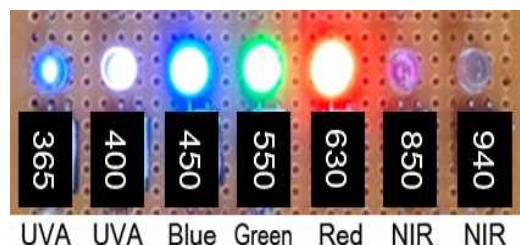
할 수 있도록 만들었다. 필터는 앞서 설명한 바와 같이 카메라 내부의 핫미러를 제거하고 ZWB3 필터를 수납부에 장착하였다.



<그림-07> 제작한 카메라 기본 구성
(a.3D모델, b.필터 수납부(ZWB3), c.카메라 모습)

(4) 테스트 촬영

테스트 촬영은 카메라 CMOS 센서가 표현할 수 있는 모든 범위의 파장을 촬영해야 하므로 주요 파장별 LED 어레이를 준비하여 촬영하였다. <그림-08>은 일반 카메라 촬영 결과로 적외선, 자외선이 촬영되지 않았다. 그러나 400nm와 365nm 자외선 LED가 빛나는 이유는 가시광선을 일부 포함하고 있기 때문이다. <그림-09>는 핫미러를 제거하고 촬영한 결과로 자외선, 가시광선, 적외선 LED가 모두 밝게 빛난다. <그림-10>은 ZWB3 필터를 장착하고 촬영한 결과로 가시광선에 해당하는 450nm, 550nm, 630nm LED 빛은 확인할 수 없고 자외선, 적외선에 해당하는 365nm, 400nm, 850nm, 940nm LED만 밝게 빛나는 것을 볼 수 있다. 이 결과로 가시광선 영상을 제외한 적외선, 자외선 영상을 동시에 촬영할 수 있음을 확인하였다.



<그림-08> 파장별 LED 어레이 : 일반 카메라



<그림-09> 파장별 LED 어레이 : 핫미러 제거



<그림-10> 파장별 LED 어레이 : ZWB3 필터 사용

2.2 비가시광선 영상의 가시성을 높이기 위한 장치

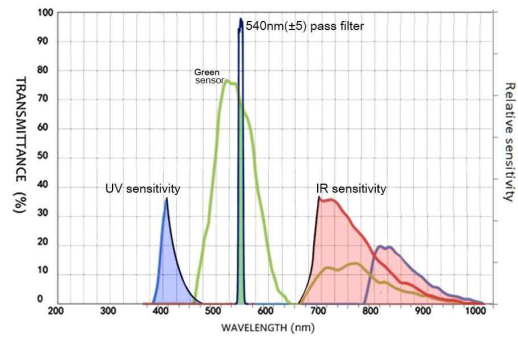
(1) 적외선, 자외선 영상의 가시성을 높이기 위한 540nm 밴드패스필터 활용

같은 위치의 피사체에 대한 렌즈의 초점거리는 파장에 따라 다르며 자외선과 적외선의 초점면은 가시광선에 비하여 멀거나 가깝다. 그러므로 한 번의 촬영으로 동시에 자외선, 적외선 초점을 맞추기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 일부 가시광선 영상을 추가로 받아들여 초점면 엇지로 활용하고 적외선, 자외선 영상의 가시성을 높인다.

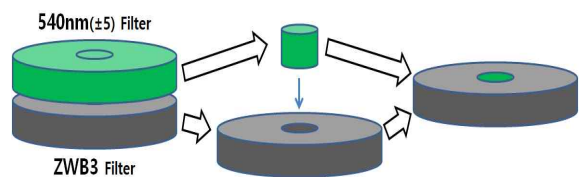
가시성을 높이기 위해 추가로 받아들일 파장 범위는 535~545nm의 짧은 초록색 영역이며 540nm(± 5) 밴드패스필터를 사용한다. 이 영역은 카메라의 Green 센서에만 기록되며 다른 센서에 영향을 주지 않는다. <그림-11>은 사용하려는 540nm(± 5) 밴드패스필터와 카메라의 Green 센서의 분광 영역 교집합을 보여주며 이 필터를 투과한 초록빛은 Blue나 Red 센서에 영향을 주지 않는다는 것을 볼 수 있다.

(2) ZBW3 필터 가공 및 540nm 밴드패스필터 결합

ZWB3 필터는 가시광선 영역을 차단하기 때문에 앞서 선택한 540nm(± 5) 밴드패스필터와 겹쳐서 사용할 수 없다. 그러나 필터를 가공하여 중앙부를 540nm(± 5) 밴드패스필터로, 주변부를 ZWB3 필터로 디자인하고 필터 위치를 렌즈의 제2주점에 위치 시킨다면 자외선과 적외선, 540nm(± 5) 초록색 가시광선을 동시에 촬영할 수 있다. <그림-12>는 필터의 가공 과정에 대한 도식이며 <그림-13>은 제작된 필터를 렌즈 제2 주점에 설치하는 모습을 보여준다.



<그림-11> 540nm 밴드패스필터 그래프와 Green 센서 그래프의 교집합



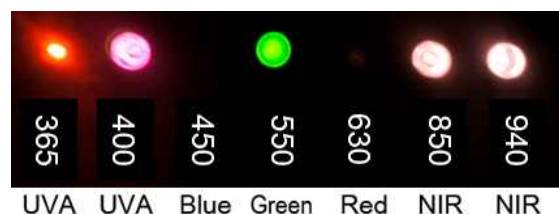
<그림-12> 필터의 가공 과정 도식



<그림-13> 가공된 필터 수납

(3) 가공된 필터의 효과검증

제작한 필터가 자외선, 적외선, 일부 초록색 가시광선(540nm(± 5))을 투과하는지 확인하기 위하여 앞서 사용한 파장별 LED 어레이를 촬영하였다<그림-14>. 계획한 대로 자외선 365nm, 400nm LED와 적외선 850nm, 940nm, 초록색 가시광선 550nm LED가 밝게 빛나는 것을 확인할 수 있었다.

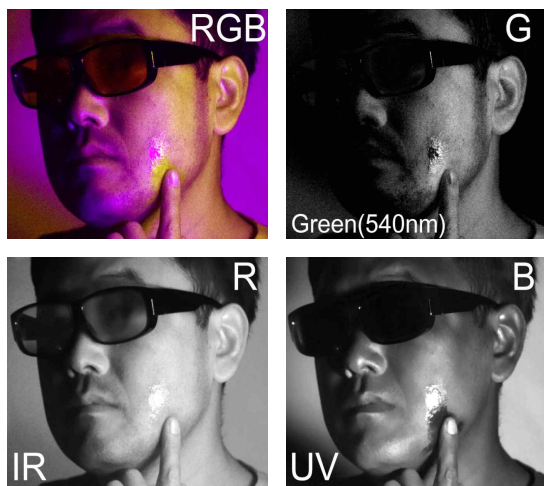


<그림-14> 제작한 필터로 촬영한 LED 어레이

2.3 촬영 영상으로부터 적외선, 자외선 영상 분리 방법, 효과검증

(1) 실제 피사체 촬영 및 채널분리

실제 피사체 촬영을 위해 초록색 조명, 720nm IR 조명, 400nm UV 조명을 준비하여 촬영해야 한다. 특히 IR 조명은 분광 범위가 750nm를 넘어갈 경우 자외선 영상과 적외선 영상을 분리할 수 없게 되기 때문이다. 그 이유는 카메라의 Blue 센서가 750nm를 기점으로 분광감도가 상승하여 적외선 빛에도 반응하기 때문이다.



<그림-15> 피사체 촬영 결과 및 채널분리

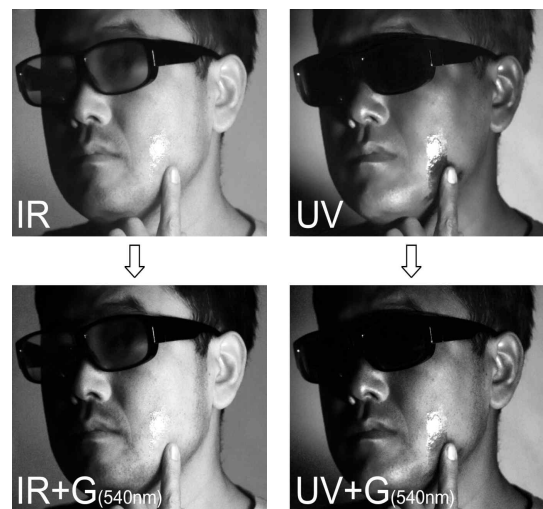


<그림-16> 일반적인 비가시광선 촬영법 결과

<그림-15>는 제작한 카메라와 조명을 이용하여 한번에 촬영한 결과로 Red 채널은 적외선 영상, Green 채널은 초록색 가시광선, Blue 채널은 자외선 영상을 보여주고 있다. 적외선, 자외선 분리는 각 채널별로 분리되어 촬영되므로 특별히 추가 비용은 발생하지 않는다. 촬영 결과에서 모델의 안경은 적외선을 투과시키므로 모델의 눈을 볼 수 있지만 자외선은 투과시키지 못하므로 검게 표현된 것을 볼 수 있다. 또한 얼굴에 바른 자외선 차단제는 적외선 영상에서 표현되지 않았지만 자외선 영상에서는 빛을 흡수하여 검게 표현된 것을 볼 수 있다.

(2) 기존의 비가시광선 촬영법 결과와 비교

<그림-16>은 기존의 적외선, 자외선 촬영에서 사용하는 BW 093 IR 830 필터와 BAADER-U 필터를 사용하여 같은 조건을 촬영한 결과이다. <그림-15>에서 채널 분리한 적외선, 자외선 결과와 비교한 결과 별다른 차이를 찾을 수 없었다.



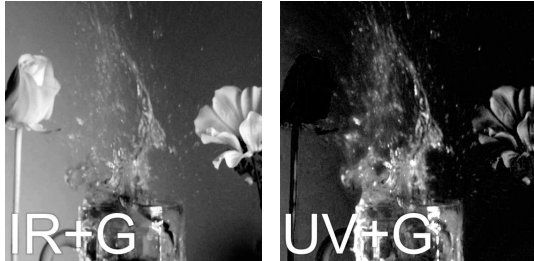
<그림-17> 가시성이 향상된 결과물

(3) Green(540nm) 영상을 이용한 가시성 향상

Green 채널, Green(540nm) 영상은 짧은 범위의 초록색 가시광선이 기록되어 있으며 적외선 채널, 자외선 채널과 각각 합쳐서 가시성을 높이는 데 사용한다. 합치는 방법은 포토샵 프로그램에서 Red(적외선), Blue(자외선) 채널 각각에 Green 채널을 blending mode - Soft Light로 적용하여 합친다. <그림-17>은 적외선, 자외선 영상의 가시성을 높이기 전, 후 사진을 보여주고 있으며 비가시광선 영상의 특이한 문路함이 개선된 것을 볼 수 있다.



<그림-18> 테스트를 위한 피사체, 일반카메라 촬영



<그림-19> 진짜 꽃, 가짜 꽃, 물튀김 순간 포착 결과



<그림-20> 여러 가지 꽃들에 대한 반응



<그림-21> 위조 문서

(4) 효과 검증을 위한 다양한 촬영결과

제작된 카메라가 자외선과 적외선 영상을 동시촬영하고 분리할 수 있는지 검증하기 위해, 다양한 상황에서 촬영을 시도하였다<그림-18>.

<그림-19>는 첫 번째 영상으로, 좌우에 진짜 꽃, 가짜 꽃을 배치하여 적외선 및 자외선 반응의 차이를 확인하였다. 좌측 진짜 꽃의 경우 적외선, 자외선 반응이 다르지만, 우측 가짜 꽃의 경우 노출 비율만 다를 뿐 유사한 반사 특성인 것을 알 수 있다. 화면 가

운데 물이 튀어오르는 형태가 동일함으로, 하나의 영상에서 분리된 것을 확인할 수 있다. <그림-20>에서는 여러 종류의 꽃에 대한 적외선과 자외선 반응을 볼 수 있으며 자외선에서 꽃의 종류별 반사 특성이 다르다는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로, <그림-21>은 위조 문서를 식별하기 위해 서로 다른 펜의 글씨를 구분할 수 있음을 보여주며, 특히 화면 위쪽 형광펜에 대한 반응 차이를 드러낸다.

III. 결론

본 연구에서는 일반 카메라를 사용하여 자외선 영상과 적외선 영상을 동시에 촬영 및 분리 할 수 있는 방법을 연구하였다. 이를 위해 카메라, 렌즈, 필터, 조명 등 구성 요소들의 분광스펙트럼을 비교하여 적절히 배치하였다. 테스트 촬영을 통해 구성된 카메라의 효과를 검증하였고, 기존의 적외선, 자외선 촬영방법 결과와 비교하였다. 적외선 및 자외선 영상의 가시성을 높이기 위해 540nm(± 5) 밴드패스필터로 가시광선 영상을 획득, 포토샵의 blending mode를 활용, 비가시광선의 몽롱함을 감소시키고 선명도를 향상시켰다.

연구 결과, 필터를 가공하여 자외선, 적외선 및 특정 가시광선 영역을 동시에 촬영하는 기술은 효과적이었음을 확인했다. 특히 540nm 가시광선을 활용하여 적외선, 자외선의 가시성을 향상한 결과는 기존의 비가시광선 영상과 비교했을 때 영상의 활용도가 한층 증가할 것으로 기대한다.

Reference

- [1] B. M. Freedman., R. V. Earley., T. P. Balakrishnan, "Digital ultraviolet reflectance photography can be used to quantify improvements in photodamage", Journal of Cosmetic Dermatology, 2005.
- [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., 2019.
- [3] F. Ray, 「Scientific Photography and Applied Imaging」, Focal Press, 2002.
- [4] Haque T., Crowther JM., Lane ME., Moore DJ, "UV filters in barrier mimetic formulations localize in the outer stratum corneum", WCD poster, 2015.
- [5] Hines, J., Wang, E, "Multispectral Thermal Imaging with a LWIR+ VIS Camera" Stanford University, 2019.
- [6] Kim T., Lee K., Baek N., Chae H., Lee S,

- “Aperture-encoded snapshot hyperspectral imaging with a lensless camera” APL Photonics. 10.1063/5.0150797. 8:6. Online publication date: 1-Jun-2023. 2023.
- [7] M. Langford, 「Langford's Advanced Photography」, Oxford: Elsevier Science Ltd., 2008.
- [8] Monakhova K., Yanny K., Aggarwal N., Waller L, “Spectral DiffuserCam: lensless snapshot hyperspectral imaging with a spectral filter array” Optica. 10.1364/OPTICA.397214. 7:10. (1298). Online publication date: 20-Oct-2020.
- [9] Seyoung P, “Compact Snapshot Hyperspectral Imaging with Diffracted Rotation” University of Suwon, 2021.
- [10] <https://www.ispag.org/presentation/3/1464/.2014> (2023.12.01)
- [11] <https://jmcsscientificconsulting.com/lens-transmission-measurement-in-the-uv/> (2023.12.01)

Endnote

- 1) Hines, J., Wang, E., “Multispectral Thermal Imaging with a LWIR+ VIS Camera” Stanford University, p.2, 2019.
- 2) Seyoung P., “Compact Snapshot Hyperspectral Imaging with Diffracted Rotation” University of Suwon, p.2, 2021.
- 3) <https://jmcsscientificconsulting.com/lens-transmission-measurement-in-the-uv/> (2023.12.01)
- 4) <https://www.ispag.org/presentation/3/1464/.2014> (2023.12.01.)