

하이퍼스펙트럴 영상처리를 이용한 사과 결점 평가⁺

Hyperspectral Imaging for Apple Defect Evaluation

최규홍*	이강진*	조영길*	박보순**	유드렌첸**
정회원	정회원	정회원	정회원	
K.H.Choi	K.J.Lee	Y.K.Cho	B.Park	Y.R.Chen

1. 서론

과일 품질평가 인자중에서 크기와 색깔에 대해서는 국내외적으로 실용화 단계에 있지만, 내외부 결함(defect) 검출에 관한 연구는 아직 연구중에 있거나 기술적으로 미해결된 부분이다. 그동안 수행된 과일의 결함 검출 연구는 주로 분광분석법과 컴퓨터 영상처리기법이 이용되어 왔다.

분광분석법은 분광광도계(spectrophotometer)를 이용하여 과일 표면의 결함부분과 정상부분을 구별하는 유효파장대를 구명하는데 효과적이다(Brown et al., 1974; Reid, 1976; Davenel et al., 1988; Upchurch et al., 1990a; Miller and Delwiche, 1991a). 그러나 이 방법은 광화이버와 같은 검출 센서를 대상물에 접촉하여 측정하고, 측정면적(직경 8~12mm)이 좁고 대상물의 일부분에 불과하다. 더구나 과일의 결함이 표면에 불규칙하게 흩어져있기 때문에 이를 적용하는데 어려움이 많다.

영상처리기법은 흑백 또는 RGB 카메라를 이용함으로써 상당히 넓은 면적을 비접촉적으로 한 번에 측정할 수 있는 장점을 갖고 있어서 농산물의 검사 또는 선별시스템 개발에 널리 활용되고 있다. 그리고 분광광도계에 의해 구명된 파장대에 해당하는 특정 필터를 카메라 앞에 설치하여 얻어진 영상으로부터 특징점을 검출하는 연구가 수행된 바 있는데, 이들의 결과에 의하면 과일의 외부결함 검출에는 가시광선보다 근적외선 영역의 영상이 한층더 효과적이라고 보고하였다(Rehkugler and Throop, 1985; Davenel et al., 1988; Upchurch et al., 1994b; Delwiche et al., 1990; Miller and Delwiche, 1991b).

근래에 RGB 카메라의 한계를 극복하고자 Multispectral 영상처리와 Hyperspectral 영상처리 연구가 원격탐사, 의학, 농업분야 등에서 도입되고 있다. 이는 하나의 넓은 파장대역에서보다는 여러개의 좁은 파장대역에서 얻어진 영상으로부터 정밀한 정보를 얻을 수 있기 때문이다(Nelson, 1997; Marmo, 1996; Hardin, 1997).

이 연구는 Hyperspectral 영상처리시스템을 구축하고, 이로부터 얻어진 사과 영상자료로부터 표면의 결함을 검출함으로써 Hyperspectral 영상처리기술의 농산물 품질평가에 응용가능성을 구명하고자 수행하였다.

+ 이 연구는 농촌진흥청 농업기계화연구소와 미국 농무부 농업연구청(USDA, ARS) 사이에 수행되고 있는 한미국제공동연구과제인 "비파괴 과일 품질판정기술개발 (Non-destructive quality evaluation of fruits)"의 일환으로 수행된 것임.

* 농촌진흥청 농업기계화연구소

** Instrumentation & Sensing Lab. NRI/ARS/USDA, U.S.A.

2. Imaging Spectroscopy

Spectrophotometer가 대상물의 좁은 면적에 대한 광스펙트럼을 측정하여, 2차원 (wavelength, intensity)으로 표현한 것인 반면에, **Imaging Spectroscopy**(또는 Spectroscopic imaging, Multi-source spectroscopy로 칭함)는 image sensor에 spectrophotometer의 기능을 추가하여 표현한 것이다.

다시 말해서 대상물 표면의 광스펙트럼 및 공간위치를 동시에 측정하여 3차원 [position(finite element), wavelength, intensity]으로 표현한 것으로서 **Imaging spectrometer** 또는 **Spectral imaging instrument**가 이용되며, 이를 영상 센서의 특성에 따라 구분하면 다음과 같다(Hardin, 1997).

- Single Imager : single wide band
Imaging infrared thermometer, B/W camera
- Multispectral Imager : a number of bands
Filter+B/W camera, RGB camera, Landsat TM(Thematic Mapper ;
6 spectral, resolution 100nm), 4 Channel Multispec Imaging Spectrometer
- Hyperspectral Imager : a few hundred bands
AVRIS(Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer)
- Ultraspectral Imager : many hundreds of bands

가. Multispectral imaging

Multispectral imager는 대상물 표면의 특징을 검출하는데 2개 이상의 특정 파장대의 간섭필터를 카메라 렌즈 앞에 부착하여 영상을 수집하는 것으로서 외부결점과 같은 다양한 특징의 검출에 적합하다. 현재 널리 활용되고 있는 RGB 카메라의 경우 파장대가 비교적 넓은 RGB 센서를 채택하고 있는데 비해, Multispectral 영상처리에서는 밴드폭이 좁은 필터(주로 10-20nm)를 필요한 개수 만큼 사용함에 따라 보다 정밀한 정보의 획득이 가능할 뿐만 아니라 가시광선(visible)에서 근적외선(NIR) 영역까지의 영상까지 얻을 수 있는 장점이 있다.

그러나 다파장의 영상을 수집하기 위해서는 기구적으로 5-8개의 필터를 장착 회전시킬 수 있는 motorized filter wheel을 사용하거나, 필요로하는 파장수 만큼의 필터와 카메라를 1대 1로 대응하여 사용해야하는 단점이 있다.

나. Hyperspectral imaging

Multispectral imaging에 비해 한 차원 진보된 기술로서 Imaging spectrometer 또는 Hyperspectral sensor로 영상정보를 수집하며, 이는 구체적으로 Spectrometer(스펙트럼)와 Imaging sensor(공간)를 조합한 센서로서 Image pixel 각각에 대한 스펙트럼을 나타낼 수 있다(구체적인 구조와 원리는 3.나항 참고).

스펙트럼과 공간을 하나의 기기로 동시에 측정하므로 시간과 비용이 절감되고, 여러개의 센서로 측정할때마다 나타나는 측도설정간의 차이를 줄일 수 있고, 가시광선에서 근적외선 범위내의 수십 또는 수백개의 파장대를 이용하므로 광역파장대의 3개 센서를 이용하는 RGB 카메라나 몇 개의 파장을 이용하는 Multispectral 카메라 보다 훨씬 정밀한 정보를 얻을 수 있다.

Hyperspectral 영상처리연구는 원격탐사(remote sensing)에서 활발하며, 주로 경지분포 및 작황, 식생대분포, 도시계획, 재난피해상황 모니터링, 군사, 광물탐사 등에 활용되고 있다.

3. 수행방법

가. 시험장치 구성

Imaging spectrograph, 라인스캔 흑백 카메라, 영상처리보드, 조명장치, 벨트컨베이어 등으로 구성된 그림1과 같은 Hyperspectral 영상처리시스템을 제작하였다. Imaging spectrograph의 영상자료 수집파장범위는 460~862.5nm, 분해능 1.5nm, 240개의 파장밴드였고, 그밖의 시험장치의 주요 제원은 표1에서와 같다.

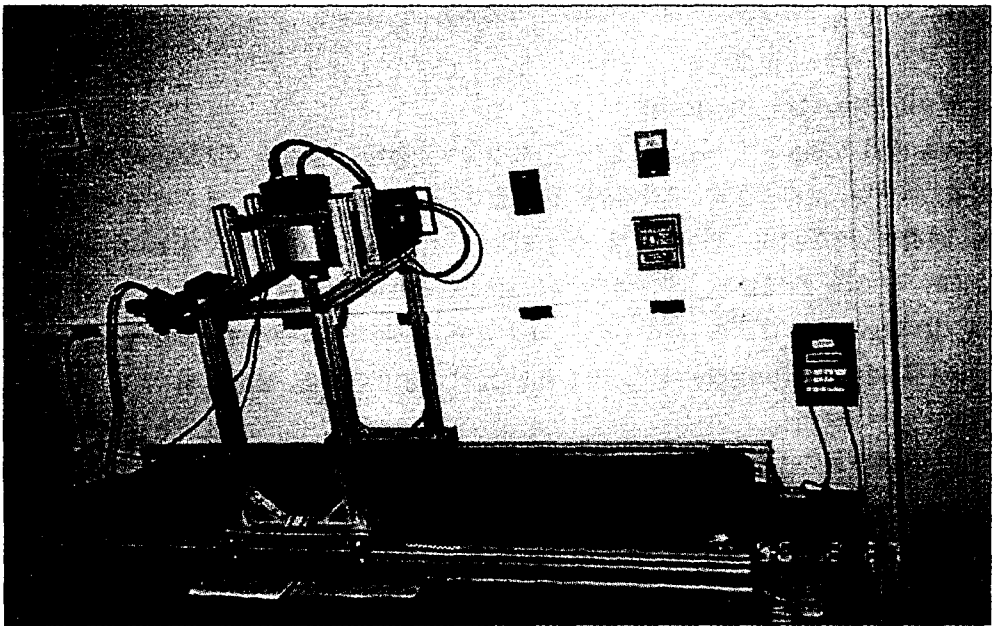


Fig. 1 Experimental equipment for hyperspectral imaging system.

나. Imaging Spectrograph

공간(X, Y)과 스펙트럼(wavelength, intensity)는 전체가 4차원이므로 기술적으로 동시 표현이 불가능하다. Imaging Spectrograph는 CCD 카메라 앞에 장착하여 대상물의 광학적

스펙트럼 성분과 공간좌표를 동시에 구현할 수 있도록 핀란드 Oulu사에 의해 개발된 분광 기기이다. 이는 공간좌표(X, Y)를 한 라인상의 단위길이의 폭을 취하여, 즉 1차원화함으로써 그림2에서와 같이 3차원(X-coordinate, wavelength, intensity)으로 나타낼 수 있다. 그림3은 Imaging Spectrograph의 구조와 원리를 나타낸 것이다.

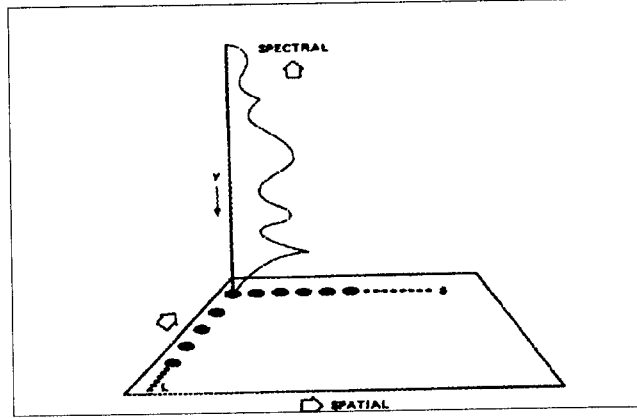


Fig. 2 Schematic of hyperspectral image data.

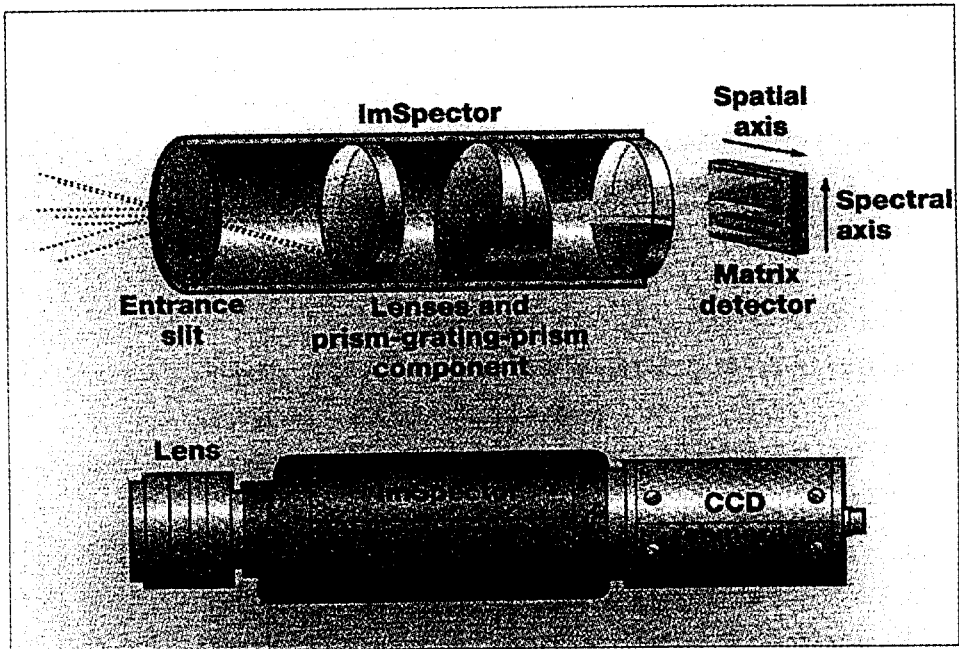


Fig. 3 Schematic diagram of imaging spectrograph.

Table 1 Specifications of hyperspectral imaging system.

Items	Specifications
Imaging spectrograph	
Manufacturer/Model	Oulu(Finland)/ImSpector V9
Spectral range	430 - 900 nm
Spectral resolution	1.5 nm
Spatial resolution	15 line-pairs/mm
Effective slit length/width	8.8mm/0.18um
Camera	
Manufacturer/Model	PixelVision Inc./SpertaVideo™ Camera PFT-95
Type	B/W matrix camera
Active pixels	512(H) × 512(V)
A/D conversion	16 bit
Light system	
Illuminator	
Manufacturer/Model	Dolan Jenner/PL-800
Lamp/Color temperature	EKE, 21V, 150Watt/3200 °K
Fiber optics	Doloan Jenner, Fiber-Lite QF5048
Belt conveyor system	
Dimension(L×W×H)	1625×580×140 mm
Motor	
Maufacturer/Model	Sparks/MR1-5-12-11
Rated power	0.25 Hp
Speed controller	
Maufacturer/Model	Lesson Electric Motors/Speedmaster

다. 시험방법

Hyperspectral 영상처리시스템의 예비시험 및 축도설정은 색종이(적색, 녹색, 청색, 노랑, 오렌지색)와 두 개의 표준 스펙트럴 램프(헬륨, 네온)를 이용하였다. 또한 최적 조명조건을 구명하고자 3200 °K, 4800 °K, 5600 °K(medium diffusion filter), 5600 °K(heavy diffusion filter) 등 4개의 조건에서 실시하였다. 공시재료는 사과(Red Delicious)였고, 스캐닝 속도는 30ms였다.

라. 영상데이터 분석

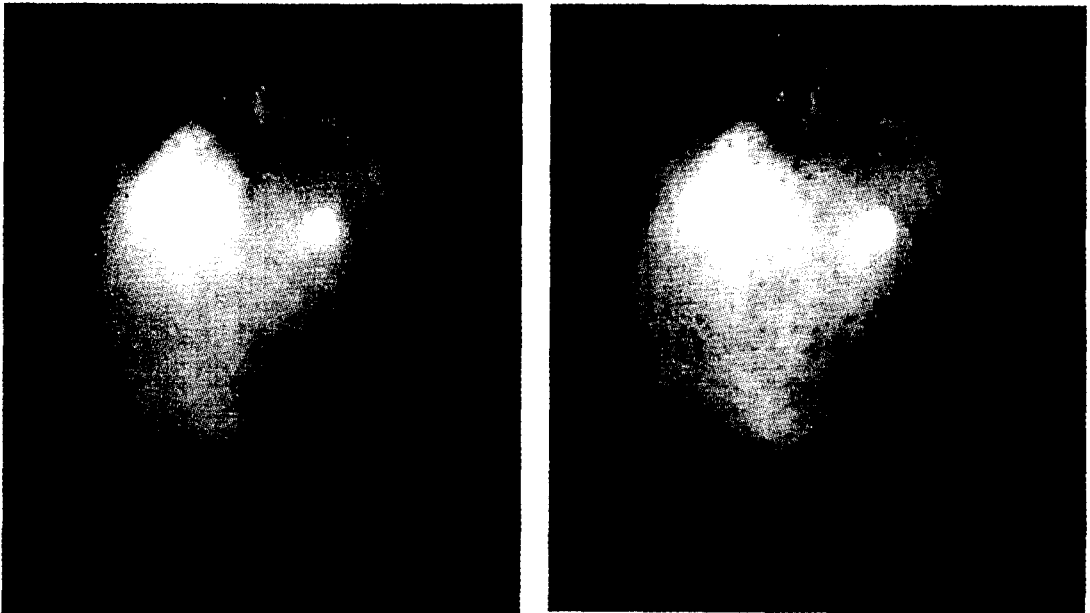
Hyperspectral 영상자료의 분석은 ENVI (Environment for Visualizing Images) 2.7 version 소프트웨어를 이용하여 분석하였다. 사용된 주요 알고리즘은 Z-Profile(Spectrum),

Animation, Forward Principal Component Analysis 등을 이용하여 사과 외부결합판정에 적절한 파장대를 구명하였다.

4. 결과 및 고찰

Hyperspectral 영상처리시스템으로 얻어진 240개의 파장대별 영상을 animation, 즉 각 파장별 영상을 육안으로 관찰한 결과, 600nm 이하의 영상은 어두운 반면에 700nm 이상의 영상은 너무 밝아 사과 표면의 반점을 관찰할 수 없었다. 그림4에서 보는 바와 같이 645~675nm에서 표면반점이 비교적 잘 나타나 이 범위의 파장대가 사과 표면결점을 검출하는데 적절할 것으로 판단된다.

한편, 측정된 하나의 영상에 대한 데이터 파일 크기는 23 megabytes(320 columns x 300 lines x 240 bands)로 영상 데이터의 크기가 대단히 크므로 파일의 온라인 선별에 적용하는 데는 많은 제약이 따를 것으로 판단된다. 따라서 이를 효과적으로 처리하기 위한 Hyperspectral 영상처리 알고리즘의 개발, 데이터의 실시간 처리를 위한 압축 및 융합기술, DSP(Digital Signal Processing)회로의 추가 등 기술적으로 해결해야 할 과제가 많다. 그러나, 이번 Hyperspectral 영상처리기술은 앞에서 기술한 바와 같은 장점이 있어 농산물의 결합, 색깔 등 특징 검출을 위한 파장대 구명에 매우 효과적인 것으로 판단된다.



645nm

675nm

Fig. 4 Apple images at different spectral bands.

그림5는 결점부위와 정상부위의 스펙트럼을 비교한 결과로서, 620-650nm의 가시광선에서와 720nm 이상의 근적외선 파장대에서 가장 큰 차이를 보였다. 복숭아와 사과 결점 검출에 근적외선 파장대가 효과적이라는 Miller 등(1991a)과 Upchurch 등(1990a)의 연구와 같은 결과를 나타냈다.

사과 외부결점의 경우 고두병(Bitter pit), Cork spot, Jonathan spot, Lenticel blotch pit 등 반점성 장애와 동녹(russeting), 열과(cracking) 등 종류가 많고, 결점의 크기도 5mm 이하에서 크기는 1cm 이상까지 다양하다. 따라서 앞으로 결점의 종류별, 크기별로 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

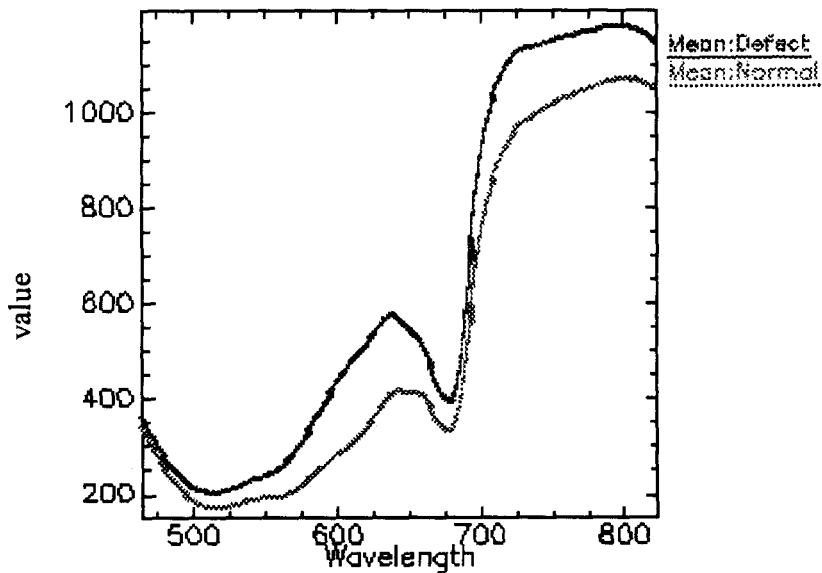


Fig. 5 Comparison of spectral reflectance for apple.

5. 요약 및 결론

이 연구는 과실의 결함 검출을 위한 기초연구로서, 현재 원격탐사(remote sensing)에서 활용되고 있는 Hyperspectral 영상처리기술의 농산물 품질평가에 응용 가능성을 타진하고자 수행되었으며, 지금까지의 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

- 가. Imaging spectrograph, 라인스캔 흑백 카메라, 영상처리보드, 조명장치, 벨트컨베이어 등으로 구성된 Hyperspectral 영상처리시스템을 제작하였다. Imaging spectrograph의 영상데이터 수집파장범위는 460~862.5nm, 분해능 1.5nm, 240개의 파장밴드였고, 사과 영상의 데이터 파일 크기는 23MB(320 columns x 300 lines x 240 bands)였다.
- 나. 수집된 Hyperspectral 영상데이터는 ENVI 2.7 소프트웨어를 이용하여 분석하였고, Z-Profile (Spectrum), Animation, Forward Principal Component Analysis 등을 이

용하여 사과 외부결합판정에 적절한 파장대를 구명하였다.

다. 파장대별로 얻어진 영상데이터를 Animation한 결과, 645~675nm 파장대에서 사과 표면의 반점이 명확하게 나타나 이 범위의 파장대가 사과 외부결점을 검출하는데 유효할 것으로 판단되었다. 또한, 사과의 결점부위와 정상부위에 대한 스펙트럼을 비교한 결과, 720nm 이상의 근적외선 파장대에서 차이가 명확한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Brown, G. K., L. J. Segerlind and R. Summit. 1974. Near-infrared reflectance of bruised apples. Transactions of the ASAE 17(1): 17-19.
2. Davenel, A., C. Guizard, T. Labarre and F. Sevilla. 1988. Automatic detection of surface defects on fruit by using a vision system. Journal of Agricultural Engineering Research 41(1): 1-9.
3. Delwiche, M. J., S. Tang and J. F. Thompson. 1990. Prune deflection by line-scan imaging. Transactions of the ASAE 33(3): 950-954.
4. Hardin, R. W., 1997. Hyperspectral imaging: How much is hype?. Photonics Spectra, July: 82-92.
5. Marmo, J. 1996. Hyperspectral imager will view many colors of earth. Laser Focus World, August: 85-92
6. Miller, B. K. and M. J. Delwiche. 1991a. Spectral analysis of peach surface defects. Transactions of the ASAE 34(6): 2509-2515.
7. Miller, B. K. and M. J. Delwiche. 1991b. Peach defect detection with machine vision. Transactions of the ASAE 34(6): 2588-2597.
8. Nelson, L. J. 1997. Simple, low-noise multispectral imaging for agricultural vision and medicine. Advanced Imaging, November : 65-67
9. Rehkugler, G. E. and J. A. Throop. 1986. Apple sorting with machine vision. Transactions of the ASAE 29(5): 1388-1397.
10. Reid, W. S. 1976. Optical detection of apple skin, flesh, stem and calyx. Journal of Agricultural Engineering Research 21: 291-295.
11. Upchurch, B. L., H. A. Affeldt, W. R. Hruschka, K. A. Norris and J. A. Throop. 1990a. Spectrophotometric studies of bruises on whole red delicious apples. Transactions of the ASAE 33(2): 585-589.
12. Upchurch, B. L., J. A. Throop and D. J. Aneshansley. 1994b. Influence of time, bruise-type, and severity on near-infrared reflectance from apple surfaces for automatic bruise detection. Transactions of the ASAE 37(5): 1571-1575.