

다중 깊이 카메라 기반 배 과실의 실시간 3차원 복원 및 부피 측정 기술 개발

홍석주, 이아영*, 김진세
국립농업과학원 농업공학부

Development of Real-time 3D Reconstruction and Volume Estimation Technology for Pear Fruit Using Multiple Depth Cameras

Suk-Ju Hong, Ahyeong Lee*, Jinse Kim

Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences

요 약 과일의 품질은 색택, 크기, 모양, 결함, 당도 등 여러 요인에 의하여 결정된다. 하지만 과실의 크기, 모양 등 기하학적 정보에 대한 선별은 대부분의 농산물 산지유통센터에서 수작업으로 이루어지고 있다. 과실의 기하학적 정보의 처리를 자동화하기 위하여 2차원 영상 기반의 연구들이 수행되었지만, 한 면에 대한 2차원 영상으로 얻을 수 있는 정보는 제한적이다. 3차원 영상 정보를 농산물에 이용하고자 하는 선행 연구들이 수행되었지만, 복잡한 처리 과정으로 인해 수확 후 선별 라인에서 적용 가능한 실시간의 처리가 불가능하였다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고 과일의 3차원 기하학 정보를 정확히 측정하고자 실시간 3차원 영상 측정 기술을 개발하고, 배 과실에 대하여 부피 계측 정확도를 평가하였다. 여러 개의 RGBD 카메라를 이용하여 여러 면의 영상 촬영이 동시에 이루어지도록 하였으며, 카메라 간의 위치 보정을 사전에 수행하여 특징점 매칭 등 시간 소모적인 작업이 촬영 시마다 수행되지 않도록 하였다. 또한, 영상 및 점군 처리를 통하여 정확한 부피 계측이 가능한 알고리즘을 설계하였다. 그 결과, 결정계수 0.9931, 평균 절대 백분율 오차 0.61%의 성능으로 배 과실의 부피가 계측 가능함을 확인하였다.

Abstract The quality of fruits is determined by various factors, such as color, size, shape, defects, and sweetness. However, at most agricultural processing centers, the grading of fruits based on geometric information like size and shape is mostly done manually. Research has been conducted on the use of 2D image-based techniques to automate the processing of geometric information of fruits, but the information obtainable from a single-view 2D image is limited. Previous studies have explored the use of 3D imaging information for fruits, but due to complex processes, real-time processing applicable at fruit sorting lines has been challenging. In this study, we aimed to address these issues by developing real-time 3D measurement technology to accurately measure the 3D geometric information of fruits, and we evaluated its volume-measurement accuracy for pear fruits. Multiple RGBD cameras were used to simultaneously capture images from multiple sides, and pre-calibration of camera positions was performed to avoid time-consuming tasks such as feature-point matching for each measurement. Furthermore, an algorithm that allows precise volume measurement was developed through image and point cloud processing. As a result, the volume of pear fruits can be measured with a coefficient of determination of 0.9931 and a mean absolute percentage error of 0.61%.

Keywords : 3D, Fruit, Pear, Grading, Sorting, Volume

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술연구개발사업(과제번호: PJ01675503)의 지원에 의해 이루어진 것임.

*Corresponding Author : Ah-Yeong Lee(National Institute of Agricultural Sciences)

email: lay117@Korea.kr

Received September 14, 2023

Revised October 5, 2023

Accepted October 6, 2023

Published October 31, 2023

1. 서론

과일의 품질을 결정하는 주요 요인으로는 선택, 크기, 모양, 외부결함, 내부결함, 당도 등이 있다. 이러한 과일의 품질에 따른 선별 작업은 농산물의 품질관리를 위한 수확 후 공정에서 필수적이다. 농산물의 선별을 위해서는 품질지표에 대한 검사가 필요하다. 파괴적인 검사의 경우 전수검사가 불가능하므로, 모든 과실에 대한 선별을 위해서는 비파괴적인 검사 방식이 필수적이다. 따라서 농산물 선별기들은 라인 내에 비파괴 검사부를 가지고 있으며, 관련 선행 연구들에서는 농산물의 품질을 비파괴적으로 측정하기 위해 분광기, 초분광 카메라, 엑스선 카메라 등 다양한 광학 장비들이 적용되었다[1-5].

과일의 기하학적 정보는 품질을 결정하는 주요 요소이다. 과일의 크기, 모양에 따라 농산물의 품질등급이 달라지며, 기형과로 분류되는 경우 등외품으로 저가에 판매되거나 폐기된다. 특히 기하학적 정보 중 과일의 부피는 산물밀도나 공극률 등에 영향을 주는 주요 물리량이다. 당도, 색, 외부결함 등 다양한 품질지표를 선별 기준으로 하는 선별기들이 개발되고 보급되었지만, 과실의 기하학적 정보에 따른 선별 작업은 대부분 육안으로 수행되고 있다. 이러한 수작업 선별은 개인의 숙련도나 판별 기준 차이에 따라 시간이나 정확도 차이가 발생하며, 노동력의 추가 투입이 필요하다.

과일의 기하학적 정보를 비파괴적으로 검사하기 위한 선행 연구들은 주로 이차원 영상을 기반으로 수행되었다 [6-8]. 하지만 과일을 포함하는 농산물은 공산품과는 달리 개개의 크기와 모양이 큰 차이를 보이며, 특히 모양이 대칭성을 갖지 않는 경우가 많다. 이러한 복잡성 때문에, 한 방향에서의 영상으로는 과일의 정확한 기하학적 정보를 얻기 어렵다. 이송 중의 과일을 회전시키며 영상을 촬영하여 여러 면의 영상을 얻는 방식 또한 적용되고 있지만, 과일의 크기나 모양에 따라 회전이 불규칙적이기 때문에 과일 형상의 정량화는 어렵다. 반면 3차원 영상은 물체의 전체 형상정보를 온전히 갖기 때문에, 부피나 길이, 폭 등 여러 지표에 대한 정확한 분석이 가능하다.

농업 분야에서는 정확한 기하학적 특징의 분석을 위해 3차원 영상 기술이 적용되었으며, 특히 작물의 표현형분석을 위한 3차원 영상 기술 연구들이 활발히 수행되었다 [9-11]. 이러한 선행 연구들에서는 주로 여러 면에서 2차원 영상을 촬영하고, 그로부터 3차원 영상을 복원하는 방법이 이용되었다. 수확 후 과실의 형상 분석을 위한 3차원 연구들에서도, 카메라 혹은 대상 과일을 회전시키

며 2차원 영상을 촬영한 후 정합 과정을 통해 3차원 영상을 복원하였다[12,13].

다중 2차원 영상을 기반으로 한 3차원 영상 복원 방식에서는 여러 방향에서 촬영된 2차원 영상들의 특징점 추출과 매칭 과정이 수행된다. 하지만 이러한 특징점 추출과 매칭이나 점군(Point cloud) 간 정합 과정은 3차원 복원의 속도를 지연시킨다. 또한, 하나의 카메라를 이용하는 경우, 카메라가 대상의 여러 면을 촬영하도록 이동하거나 카메라가 고정된 경우 대상을 회전시키며 촬영해야 하며, 이러한 과정은 처리시간을 증가시킨다. 하지만 과일의 수확 후 선별 라인에서는 처리 속도는 처리량과 직결되기 때문에, 실시간에 가까운 측정 및 처리 속도가 필수적이다.

본 연구에서는 과일의 실시간 3차원 영상 측정을 위하여 다중 카메라로 동시에 여러 시점의 영상을 측정할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 또한, 색뿐 아니라 깊이 정보가 포함된 RGBD 카메라를 사용하여, 각 카메라의 내장 보드에서 연산되는 깊이 정보로 빠른 복원 처리가 가능하도록 하였다. 여러 카메라에서의 깊이 정보로부터 점군들을 정합할 때에 카메라 간의 좌표변환행렬의 계산은 시간 소모적이기 때문에, 사전에 체스판 보정을 통하여 고정된 카메라들간의 좌표변환행렬을 계산하였다. 구성된 카메라 시스템을 이용하여 배 과실들의 영상들이 촬영되었으며, 대표적인 기하학적 특성인 부피 예측의 성능을 통해 시스템을 평가하였다.

2장 본문에서는 과일의 다면 RGBD 영상을 실시간으로 취득하기 위한 3차원 영상 시스템의 구성과 다중 카메라의 단일 좌표계로의 보정을 위한 알고리즘을 기술하였다. 또한, 배 과실의 부피측정 성능 평가를 위한 실험의 재료 및 방법이 기술되고 영상처리 방법이 제시되었다. 3장 결과 및 고찰에서는 불필요 영역 및 노이즈 제거를 위한 과실 영역 추출, 그리고 구성된 시스템의 평가지표로 부피 측정 성능 결과가 기술되고 고찰되었다. 4장의 결론에서는 연구 내용의 요약과 기대효과를 다루었다.

2. 본론

2.1 3차원 영상 측정 시스템

본 연구에서는 과일의 다면을 동시에 촬영하기 위하여, 5개의 RGBD 카메라를 기반으로 3차원 영상 측정 시스템을 구성하였다. 특징점 매칭 등의 연산 과정을 줄이기 위하여 카메라의 자체 보드에서 스테레오 매칭 과

정을 거쳐 최대 초당 60프레임까지 깊이 영상이 측정 가능한 Realsense D405 (Intel Realsense Inc., California, USA) 카메라가 사용되었다. Table 1은 실험에 사용된 깊이 카메라의 사양이다. Fig. 1은 구성된 촬영 시스템이다. 샘플을 놓는 위치의 상방에 하나의 카메라가 장착되었으며, 측방으로 4개의 카메라가 90도 간격으로 장착되었다. 외부의 빛을 차단하기 위하여 암실이 구성되었으며, 시료에 균일한 빛을 조사하기 위해 5개의 링 형태의 LED 조명들이 설치되었다.

Table 1. Specification of depth camera

Camera	Realsense D405
Principle	Stereoscopic
Ideal range	7 cm to 50 cm
Field of view	87° × 58°
Resolution	Up to 1280 × 720
Depth accuracy	±2% at 50 cm

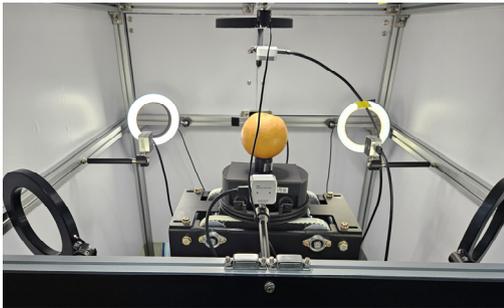


Fig. 1. 3D measurement system

2.2 카메라 좌표 보정

2차원 영상들로 3차원 영상을 복원하는 선행 연구들에서는 각 카메라가 촬영된 위치에 대한 정보가 없으므로, 영상 내부에서의 2차원 특징점 매칭이나 점군 형상 정보를 이용한 점군 간 정합 알고리즘을 이용하여 3차원 복원이 수행되었다. 특징점 매칭이나 점군 간 정합 알고리즘을 통한 변환행렬의 계산을 촬영할 때마다 반복하는 것은 시간 소모적이며, 실시간 측정 및 분석을 불가능하게 한다. 선행 연구들에서도 다수의 영상들로부터 하나의 3차원 영상을 복원하는 과정에서 가장 큰 시간이 소모된다 [12,13]. 본 연구에서 개발된 시스템에서는 카메라의 위치와 방향이 고정되어 있으므로, 한 번의 카메라 좌표계 보정 과정만을 거친다. 이후 영상 측정 시에는 초기 보정에서 계산된 변환행렬을 이용하여 모든 카메라의

좌표계를 통합할 수 있도록 하였다. 이를 위해서는 카메라 위치에 대한 초기 보정 과정이 필요하다.

카메라들의 위치 보정을 위해서, 상방의 카메라를 기준이 되는 주 카메라로 지정하고, 주 카메라와 나머지 네 개의 카메라들 사이의 체스판 보정을 통해 변환행렬을 계산하였다. 먼저 두 카메라의 시야 영역에 체스판을 위치시키고 촬영하고, 체스판의 코너 좌표를 RGB 영상을 이용하여 인식한다. 다음으로 RGB 영상에서 인식된 체스판의 코너에 해당하는 깊이 영상좌표를 구하고, 깊이 영상을 3차원 점군 데이터로 변환한다. 마지막으로, 두 카메라에서의 체스판 코너 3차원 좌표들 사이의 변환행렬을 계산한다. 이와 같은 과정을 주 카메라와 나머지 네 개의 카메라 사이에서 반복하여 각 카메라 좌표계를 주 카메라의 좌표계로 변환하는 네 개의 변환행렬을 계산한다. 각 촬영 시마다 정해진 변환행렬을 이용하여 네 개의 카메라 좌표계를 주 카메라 좌표계와 일치시킨다. Fig. 2는 보정에 사용된 체스판이다.

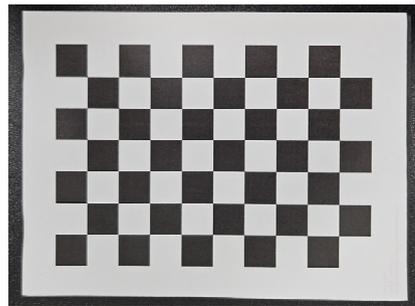


Fig. 2. Chessboard used for coordinate calibration

2.3 잡음 제거 영상처리

다수의 카메라가 사용되는 시스템의 비용을 고려하여 본 연구에서는 50만 원 미만의 저가형 스테레오 매칭 방식의 깊이 카메라를 적용하였다. 조사된 빛이 반사되어 돌아오는 시간을 통해 깊이를 측정하는 ToF (Time-of-Flight) 깊이 카메라도 고려되었지만, 실험 결과 근적외선 투과성을 갖는 과실 대상으로는 깊이 오차가 발생하여 적합하지 않았다.

Realsense D405 카메라는 패턴 조사 등 능동적 작동 없이 RGB 영상만으로 수동적 스테레오 매칭이 수행되기 때문에 깊이 영상에서 많은 잡음이 발생한다. 이러한 잡음을 보정하기 위해, 각 카메라의 RGB 영상에서 영상처리를 통해 배 과실의 영역을 추출하고, 해당하는 영역의 깊이 정보만을 3차원 영상의 구성에 이용하고자 하였다. 이를 위하여 RGB 영상을 Lab와 HSV 색공간으로 변환

하여, 과실 영역의 추출에 적합한 색공간을 선정하였다. 선정된 영상으로부터 오츠 임계값(Otsu's threshold)을 이용한 이진화 방식을 통하여 과실과 배경을 분리한 뒤, 과실에 해당하는 좌표의 깊이 정보만을 이용하여 3차원 영상을 구성하였다[14].

2.4 배 과실 3차원 영상 촬영 및 부피 실측

구성된 3차원 영상 측정 시스템으로 배 과실을 촬영하기 위하여, 21개의 배 시료가 준비되었다. 과실의 배치 자세에 따른 부피측정 경향성 차이를 분석하기 위하여, Fig. 3 (a)와 같이 꼭지가 윗면을 향하는 자세와 Fig. 3 (b)와 같이 꼭지가 측면을 향하는 자세로 과실을 배치하여 촬영하였다. 각 자세에 대해서 과실을 회전시키며 3회 반복 촬영하여 하나의 과실에 대하여 총 6회 반복 촬영되었다.

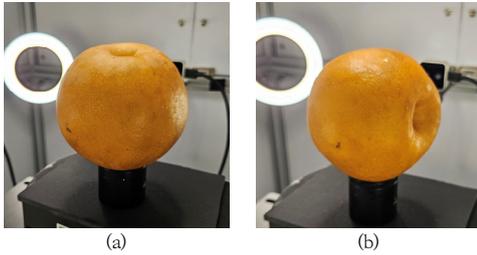


Fig. 3. Orientation of pear fruits (a) Upward orientation (b) Sideward orientation

과실들은 3차원 영상 측정 시스템으로 촬영된 후, 물 치환법을 이용하여 실측 부피가 측정되었다. 물 치환법은 용기에 물을 담고 저울에 올린 후, 부피를 재고자 하는 물체가 용기에 닿지 않고 완전히 물에 잠겼을 때 부력으로 인해 증가하는 무게를 측정하여 부피를 계산하는 방식이다. 시료에 수분의 침투가 염려되지 않는 시료일 경우 사용이 가능하여 과실 등 농산물의 부피측정에 이용된다. 식 (1)은 물 치환법을 이용한 부피의 계산을 보여준다[15].

$$V = \frac{W_{bfw} - W_{bw}}{\gamma_w} \quad (1)$$

Where, V represents the volume of the fruit, W_{bfw} is the weight of container, water and fruit when fruit was fully submerged in water in the container (N), W_{bf} is the weight of the container and the water (N), and γ_w is the specific weight

of water (9810 N/m^3).

2.5 점군 데이터 처리

측정된 점군 데이터의 빠른 부피 계산을 위하여 처리 알고리즘이 고안되었다. 첫 번째로, 처리 시간을 줄이고 잡음을 제거하기 위하여 측정된 점군 데이터를 다운샘플링(downsampling)하였다. 최적 다운샘플링 조건을 결정하기 위하여 초기 점의 수에서 10%, 5%, 1%, 0.5%, 0.1%, 0.01%로 다운샘플링 하였을 때의 부피측정 성능과 점군 데이터 처리 속도의 관계를 비교 평가하였다. 다운샘플링을 마친 점군 데이터로부터 모든 점을 포함하는 컨벡스 헐(convex hull)을 계산하고, 해당하는 메쉬(mesh)로부터 부피를 계산하였다. 계산된 부피와 물치환법으로 실측된 부피의 선형회귀분석을 통해, 부피측정에 대한 성능을 평가하였다. 성능지표로는 결정계수(Coefficient of determination, 이하 R^2), 평균 제곱근 오차(Root Mean Squared Error, 이하 RMSE), 평균 절대 백분율 오차(Mean Absolute Percentage Error, 이하 MAPE)가 이용되었으며 수식은 다음과 같다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAPE(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (4)$$

Where, y_i is the measured volume of the i_{th} sample using the water replacement method, \hat{y}_i is the measured volume of the i_{th} sample using the 3D measurement system, \bar{y} is the mean of measured fruit volumes and n is the number of samples.

3. 결과 및 고찰

3.1 과실 영역 추출

Fig. 4은 과실의 RGB, Lab, HSV 색공간 각 채널의 회색조 영상이다. 여러 채널 영상 중, 배경 영역과 과실

영역의 강도 차이가 가장 뚜렷하게 나타난 b 채널 영상을 과실 영역 추출에 이용하였다. Fig. 5는 선정한 b 채널 영상으로부터 오투스 이진화 방법을 기반으로 한 과실 영역 추출과정을 보여준다. 오투스 이진화 후 기하학적 연산을 통해 노이즈가 제거되었다. 모든 촬영 영상에 대하여 과실 영역의 성공적인 추출이 가능하였다.

구성된 3차원 영상 시스템에서 물체를 촬영할 시에 발생하는 잡음은 주로 깊이 영상에서 물체와 인접한 바깥 영역에서 발생한 잡음에 기인한다. 따라서 2차원 RGB 영상에서 과실 영역만을 정확히 인식하고, 해당하는 깊이 정보만을 3차원 영상 복원에 사용할 경우 잡음이 크게 줄어들었다. 또한, 관심 영역인 과실 외 다른 영역에 대한 점군 데이터를 제거해주는 효과가 있다. Fig. 6 (a)는 과실 영역 추출 알고리즘 적용 전의 3차원 영상이며, Fig. 6 (a)는 적용 후의 3차원 영상이다. 잡음과 관심 외 영역이 제거되어 관심 영역인 배 과실에 해당하는 점군만이 복원된 것을 확인할 수 있다.

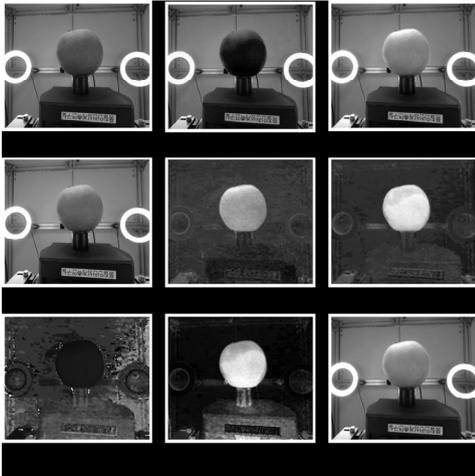


Fig. 4. Images of RGB, Lab and HSV color spaces

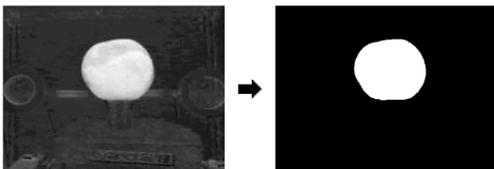


Fig. 5. Fruit area extraction based on the Otsu's threshold

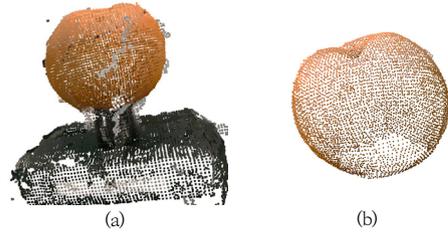
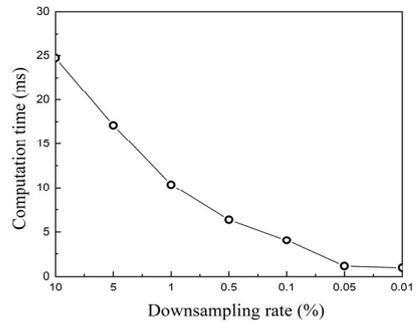


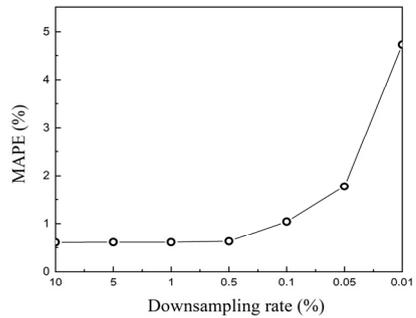
Fig. 6. 3D reconstruction results (a) without fruit area extraction (b) with fruit are extraction

3.2 부피 계측 성능 평가

Fig. 7 (a)와 (b)는 각각 점군 다운샘플링 비율에 따른 부피 예측 연산시간과 MAPE를 나타낸 그래프이다. 다운샘플링 비율 10%에서 25 ms의 연산시간을 보였으며, 0.01%에서는 0.48 ms로 샘플링되는 점군이 적어질수록 연산시간은 빨라졌다. 반면 MAPE는 10%에서 0.5%까지의 다운샘플링 비율에서는 0.61%를 유지하다가, 더 작은 비율에서는 오차가 증가하였다. 따라서 0.61%의 MAPE를 가지는 조건 중 연산시간이 4.02 ms로 가장 짧은 0.5% 이 최적의 다운샘플링 비율로 선정되었다.



(a)



(b)

Fig. 7. Performances of 3D measurement according to downsampling rate (a) computation time (b) MAPE

Table 2와 Fig. 8은 본 연구에서 구성된 3D 영상 측정 시스템의 배 과실에 대한 부피 예측 성능 결과이다. 전체 촬영 데이터에 대해 R^2 0.9931, RMSE cm^3 , MAPE 0.61%로 우수한 예측 성능을 보였다. 3D 영상을 이용하여 계측된 부피는 실측 부피보다 낮은 경향을 보였는데, 이는 촬영이 어려운 아랫면의 사각지대 때문으로 고려된다. 하지만 선형 회귀를 통하여 보정을 거치면 높은 정확도로 부피가 예측 가능하였다. 과실의 꼭지가 상방을 향한 자세와 측방을 향한 자세에 대하여 각각 분석하였을 때는 두 경우 모두 전체 데이터에 대한 분석 대비 더 낮은 오차가 나타났다. 이는 과실의 배치 자세에 따라서 샘플이 배치되는 밑면이 가려지는 정도가 다르기 때문으로 생각된다. 하지만 전체 데이터와 0.03% 차이 가량으로 나타났기 때문에, 자세와 관계없이 정확한 부피 예측이 가능한 것으로 판단된다.

Table 2. Evaluation result of volume estimation of 3D measurement system

	Whole	Upward orientation	Sideward orientation
R^2	0.9931	0.9940	0.9936
RMSE	4.47 cm^3	4.31 cm^3	4.16 cm^3
MAPE	0.61%	0.58%	0.57%

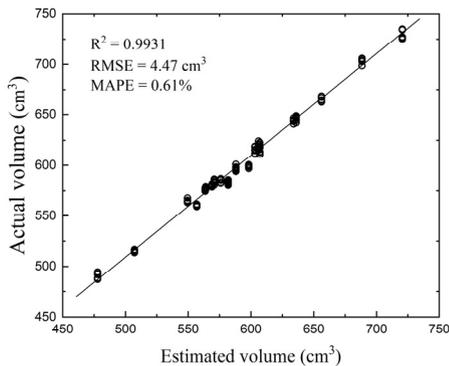


Fig. 8. Scatter plot of estimated volumes using 3D measurement system and actual volumes measured with water replacement method

3차원 영상의 측정과 부피 계측까지 걸리는 시간은 평균 38 ms로, 1초에 25번 이상의 처리가 가능하여 농산물의 선별 라인에 적용 가능한 속도로 판단되었다. 또한, 구성된 시스템은 농산물의 다면의 RGB 영상 또한 취득 가능하므로 농산물의 색깔이나 외부결함에 대한 선별에도 이용할 수 있다. 현재 시스템에서 5개의 카메라 시

템으로부터 동시에 영상을 받기 때문에 프레임 속도를 최대치로 설정하면 병목 현상이 발생한다. 이러한 병목 현상을 해결하기 위하여 USB 보드를 추가하고 연산 작업에도 최적화를 거친다면, 더 빠른 측정 및 처리가 가능해질 것으로 기대된다.

4. 결론

본 논문에서는 과실의 기하학적 정보에 대한 검사를 위하여 실시간 3차원 영상 측정 시스템을 구성하였으며, 배 과실의 부피 예측 성능을 평가하였다. 다중 RGBD 카메라를 이용하여 실시간으로 3차원 영상을 획득할 방법을 고안하였으며, 21개의 배 과실에 대하여 3차원 영상 기반으로 계산된 부피와 물 치환법으로 구해진 부피를 비교하였다. 주요한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 고정된 위치를 갖는 다중 RGBD 카메라와 체스판 보정을 이용하여, 시간 소모적인 특징점 매칭이나 점군 간 정합 과정 없이 실시간 3차원 영상 측정이 가능하였다.
- (2) RGB 영상에서 배 과실의 영역을 효과적으로 추출할 수 있는 색공간 채널이 선정되었으며, 2차원 영상에서의 과실 영역 추출로 3차원 영상에서 잡음 및 관심 외 영역 제거가 가능하였다.
- (3) 배 과실에 대한 부피 측정 오차는 0.61%로 나타내 구성된 3차원 영상 측정 시스템을 이용하여 과실의 정확한 3차원 영상 복원이 가능함을 확인하였다.
- (4) 3차원 영상 측정부터 데이터 처리를 통한 부피 계측까지 38 ms의 시간으로, 선별 라인에 이용 가능한 실시간 처리 성능을 보였다.
- (5) 본 연구에서 개발된 시스템은 부피뿐 아니라 기형, 밀도 등 다양한 기하학적 정보에 대한 측정에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.
- (6) 본 연구에서 개발된 장치와 기술은 선행 연구들에서 불가능하던 실시간적인 과일의 기하학적 정보 취득 및 분석을 가능케 하였으며, 과일의 기하학적 정보를 기반으로 한 자동 품질판정기의 개발에 공헌할 수 있을 것으로 기대된다.
- (7) 기하학적 품질에 따른 등급의 현행 기준은 현장에서 간단하게 측정될 수 있는 단순한 기준으로 정해져 있으므로, 본 연구에서 개발된 시스템에서 측정 가능한 구형률 등 새로운 지표로 더 세부적인 품질 기준을 정립할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ01675503)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- [1] S. -Y. Kim, S.-J. Hong, E. Kim, C.-H. Lee, G. Kim, "Neural Network Based Prediction of Soluble Solids Concentration in Oriental Melon Using VIS/NIR Spectroscopy", *Applied Engineering in Agriculture*, Vol.37, No.(4), pp.653-663, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.13031/AEA.14332>
- [2] S. -J. Hong, Tao Yang, S. -Y. Kim, E. Kim, C. Lee, N. I. Nurhisna, S. Kim, S. -W. Roh, J. Ryu, G., Kim. "Nondestructive Prediction of Rice Seed Viability Using Spectral and Spatial Information Modeling of Visible-Near Infrared Hyperspectral Images", *Journal of the ASABE*, Vol.65, No.5, pp. 997-1006, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.13031/ja.14982>
- [3] X. Zhao, H. Que, X. Sun, Q. Zhu, M. Huang. "Hybrid Convolutional Network Based on Hyperspectral Imaging for Wheat Seed Varieties Classification", *Infrared Physics & Technology*, Vol. 125, p.104270, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104270>
- [4] P. M. Keagy, B. Parvin, T. F. Schatzki, "Machine Recognition of Navel Orange Worm Damage in X-Ray Images of Pistachio Nuts.", *LWT - Food Science and Technology*, Vol.29, No.1-2, pp.140-45, 1996.
DOI: <https://doi.org/10.1006/FSTL.1996.0019>
- [5] M. R. Ahmed, J. Yasmin, C. Wakholi, P. Mukasa, B. K. Cho, "Classification of Pepper Seed Quality Based on Internal Structure Using X-Ray CT Imaging", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.179, p.105839, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105839>
- [6] H. Sadrnia, A. Rajabipour, A. Jafary, A. Javadi, Y. Mostofi, "Classification and Analysis of Fruit Shapes in Long Type Watermelon Using Image Processing.", *International Journal of Agriculture & Biology*, Nol.1, No.9, pp.68-70, 2007.
- [7] L. Fu, S. Sun, R. Li, S. Wang, "Classification of Kiwifruit Grades Based on Fruit Shape Using a Single Camera", *Sensors*, Vol.16, No.7, p.1012, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s16071012>
- [8] T. Ishikawa, A. Hayashi, S. Nagamatsu, Y. Kyutoku, I. Dan, T. Wada, K. Oku, Y. Saeki, T. Uto, T. Tanabata, S. Isobe, N. Kochi, "Classification of Strawberry Fruit Shape by Machine Learning" *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.42, pp.463-70, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-463-2018>
- [9] M. Yang, S. -I. Cho, "High-Resolution 3D Crop Reconstruction and Automatic Analysis of Phenotyping Index Using Machine Learning", *Agriculture*, Vol.11, No.10, p.1010, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11101010>
- [10] S. Wu, W. Wen, W. Gou, X. Lu, W. Zhang, Z. Xiang, L. Chen, L. Chen, X. Guo, "A miniaturized phenotyping platform for individual plants using multi-view stereo 3D reconstruction", *Frontiers in Plant Science* Vol.13, p.897746, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.897746>
- [11] J. C. Rose, S. Paulus, H. Kuhlmann, "Accuracy Analysis of a Multi-View Stereo Approach for Phenotyping of Tomato Plants at the Organ Level", *Sensors*, Vol.15, No.5, pp.9651-9665, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s150509651>
- [12] T. Jadhav, K. Singh, A. Abhyankar, "Volumetric Estimation Using 3D Reconstruction Method for Grading of Fruits." *Multimedia Tools and Applications*, Vol.78, pp.1613-34, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6271-3>
- [13] W. Xie, S. Wei, D. Yang, "Morphological Measurement for Carrot Based on Three-Dimensional Reconstruction with a ToF Sensor." *Postharvest Biology and Technology*, Vol.197, p.112216, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112216>
- [14] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms.", *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, Vol.9, No.1, pp.62-66, 1979.
- [15] Dong-Hyeok Geum, Post-Harvest Process Engineering, p.849, CIR, 2008, p.102.

홍 석 주(Suk-Ju Hong)

[정회원]



- 2016년 8월 : 서울대학교 바이오 시스템공학과 (공학사)
- 2022년 8월 : 서울대학교 바이오 시스템공학과 (공학박사)
- 2023년 4월 ~ 현재 : 국립농업과학원 농업공학부 전문연구원

<관심분야>

농업공학, 품질계측, 수확후공정공학

이 아 영(Ahyeong Lee)

[정회원]



- 2017년 8월 : 서울대학교 바이오 시스템공학과 (공학사)
- 2019년 8월 : 서울대학교 바이오 시스템공학과 (공학석사)
- 2023년 2월 : 서울대학교 바이오 시스템공학과 (공학박사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 국립농업과학원 농업공학부 농업연구사

〈관심분야〉

분광분석, 영상처리

김 진 세(Jinse Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 고려대학교 물리학과 (물리학석사)
- 2018년 8월 : 충남대학교 농기계 공학과 (농기계공학박사)
- 2013년 10월 ~ 현재 : 국립농업과학원 수확후관리공학과 농업연구사

〈관심분야〉

물리학, 농업공학