3차원 영상을 이용한 원예산물의 크기와 플러그묘의 평균초장 추정

장동화¹ · 김현태² · 김용현^{3,4*}

¹전북대학교 대학원 농업기계공학과

²경상대학교 농업생명과학대학 바이오시스템공학과

³전북대학교 농업생명과학대학 생물산업기계공학과

⁴전북대학교 농업기계ICT융합연구소

Estimation of the Dimensions of Horticultural Products and the Mean Plant Height of Plug Seedlings Using Three-Dimensional Images

Dong Hwa Jang¹, Hyeon Tae Kim², and Yong Hyeon Kim^{3,4*}

¹Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Graduate School, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

²Dept. of Biosystems Engineering, College of Agriculture & Life Sciences, Gyeongsang National University
(Institute of Agriculture & Life Science), Jinju 52828, Korea

³Dept. of Bioindustrial Machinery Engineering, College of Agriculture & Life Sciences,
Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

⁴Institute for Agricultural Machinery & ICT Convergence, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

Abstract. This study was conducted to estimate the dimensions of horticultural products and the mean plant height of plug seedlings using three-dimensional (3D) images. Two types of camera, a ToF camera and a stereo-vision camera, were used to acquire 3D images for horticultural products and plug seedlings. The errors calculated from the ToF images for dimensions of horticultural products and mean height of plug seedlings were lower than those predicted from stereo-vision images. A new indicator was defined for determining the mean plant height of plug seedlings. Except for watermelon with tap, the errors of circumference and height of horticultural products were 0.0-3.0% and 0.0-4.7%, respectively. Also, the error of mean plant height for plug seedlings was 0.0-5.5%. The results revealed that 3D images can be utilized to estimate accurately the dimensions of horticultural products and the plant height of plug seedlings. Moreover, our method is potentially applicable for segmenting objects and for removing outliers from the point cloud data based on the 3D images of horticultural crops.

Additional key words : 3D sensor, depth information, stereo vision, ToF camera

서 언

ICT 기술과 기존의 생산, 가공, 유통, 서비스 산업이 융합되는 4차 산업혁명 기술은 정보의 지능화와 새로운 가치를 창출하면서 농작업의 자동화 및 로봇화를 견인하여 농업 경쟁력을 강화시킬 수단으로 주목받고 있다. 농작업의 자동화 및 로봇화 기술은 생산비 절감, 노동력 절감 또는 환경제어 정도를 향상시킬 것으로 기대된다 (Edan 등, 2009).

영상은 농작업의 자동화 및 로봇화를 구현하기 위한 기본 요소에 해당한다. 더구나 영상 처리 기술의 발전,

저렴한 기계시각 장치의 등장 및 비접촉 또는 비파괴적인 측정을 가능케 하는 기계시각의 특성 등에 힘입어 여러 형태의 농작업을 수행하는 단계에서 3차원 영상의 활용이 검토되고 있다(Grift, 2008; Vázquez-Arellano 등, 2016). 이제까지 농업 분야에서 3차원 영상 시스템의 도입이 제한을 받은 이유로서 경제적인 측면에서의 타당성을 확보하지 못했던 점을 들 수 있다. 즉 가격이 저렴한 원예산물을 생산하는 단계에서 고가의 영상획득 장치를 사용한다는 지적을 피할 수 없었다. 그런데 고가의 액추에이터(actuator)가 자동화 또는 로봇 시스템의 핵심 요소로 사용되고 있는 현재의 상황에서 이러한 지적은 더 이상 타당하지 않다.

3차원 영상은 기준 좌표계로부터 임의의 객체 표면에 있는 수많은 점들 사이의 깊이 정보(depth information)의 집합으로 정의된다(Besl, 1988). 일반적으로 깊이 정

*Corresponding author: yhkim@jbnu.ac.kr

Received August 22, 2019; Revised September 18, 2019;

Accepted October 01, 2019

보를 획득할 때 비행시간(Nakarmi와 Tang, 2012; Yin 등, 2013), 삼각측량(Zhao 등, 2012), 간섭(Thilakarathne 등, 2014)의 원리가 적용된다. 이러한 원리에 더하여 스테레오비전(Kise 등, 2005; Wei 등, 2005; Viazzi 등, 2014) 또는 구조광(Nissimov 등, 2015)을 이용한 3차원 영상은 작물, 장애물 또는 가축의 위치 인식 등에 활용되고 있다.

영상 측정 시스템을 통해 획득된 3차원 영상에는 복잡한 형태의 깊이 정보를 포함하여 수많은 정보가 담겨 있다. 그런데 3차원 영상을 2차원 영상으로 표현할 때 깊이 정보가 사라진다(Ma 등, 2004). 때문에 깊이 정보를 추출해내는 기술은 3차원 영상처리 기술의 핵심에 해당한다.

3차원 영상처리에 대한 관심이 증가하고 있는 가운데 농산물 또는 원예작물의 형태적 특성을 분석하고자 3차원 영상의 활용이 검토되고 있다. 이러한 형태적 특성에는 농산물의 크기 또는 체적, 작물의 초장 등이 포함된다. 농산물 또는 작물에 대한 3차원 영상 정보를 이용할 경우 이것들의 형태적 특성을 측정하는데 필요한 노력을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 들레와 같이 2차원 영상에서 결정하기 어려운 형태적 특성의 측정이 가능하다. 더구나 원예산물에 대한 3차원 영상 해석을 통해서 원예산물의 체적 또는 무게 등과 같은 부가적인 정보를 얻을 수 있다. 또한, 플러그트레이를 사용하는 각종 과채류와 엽채류는 물론 벼를 육묘하는 육묘 현장에서 플러그트레이 단위로 플러그묘의 평균 초장을 결정할 수 있다.

이제까지 플러그묘의 초장, 엽장 또는 줄기직경 등의 생장 관련 데이터를 측정할 때 자 또는 캘리퍼스 등의 수단이 사용되었다. 이 경우 반복적인 측정이 이루어지는 하나, 대부분의 연구자들은 데이터 수집에 소요되는 노력과 시간을 줄이고자 몇 주 정도의 플러그묘를 표본으로 추출한다. 그런데 표본의 크기가 작을 경우 모집단을 대표하기 어렵다. 더구나 플러그묘의 초장, 엽색, 병징 유무 등의 묘소질을 비파괴적인 방법으로 분석하려면 플러그트레이 단위로의 측정이 바람직하다. 한편, 플러그묘의 초장을 개체 단위가 아닌 트레이 단위로 측정할 경우 기존의 측정 기준을 적용하기가 곤란하다. 플러그묘는 기본적으로 밀식된 상태로 생장이 이루어지는데 묘의 종류에 따라 본엽이 고유한 형태로 전개되므로 생장점 또는 최상단 지점을 정의하기가 쉽지 않다. 더구나 잎의 중첩으로 인해서 생장점을 찾기가 곤란하다. 때문에 플러그묘의 초장을 추정하고자 3차원 영상을 사용할 경우 실제 초장에 가까운 값을 얻을 수 있는 적절한 정의가 필요하다.

원예산물과 플러그묘의 품질 관련 요소를 영상처리 방법으로 결정하고자 수행된 본 연구의 목적은 3차원 영

상 획득 및 영상처리 기술을 적용하여 원예산물의 크기와 플러그묘의 평균초장을 추정하는 데 있다.

재료 및 방법

1. 실험 재료

원예산물의 3차원 영상을 획득하기 위한 실험 재료는 크기, 형태, 색상 등의 품질 관련 지표를 고려하여 수박, 사과, 배, 오렌지 및 단호박을 각각 1개씩 사용하였다. 또한, 플러그묘의 평균초장을 결정하고자 수박, 토마토 및 고추 묘를 실험 재료로 사용하였다. 수박, 토마토 및 고추 플러그묘는 육묘장에서 구입되었으며, 각각 40셀, 40셀, 72셀의 플러그트레이에서 육묘되었다. 생육 단계에 따라 추정된 평균 초장의 정확도를 검토하고자 3차원 영상 획득에 2종류(본엽을 기준으로 각각 3-4매, 7-8매)의 수박 플러그묘와 2종류(본엽 1-2매, 3-4매)의 토마토 플러그묘를 사용하였다. 한편, 고추 플러그묘의 본엽은 12-13매이었다.

2. 3차원 영상 측정 시스템 구성 및 영상 획득

본 연구에서 사용된 3차원 영상 측정 시스템은 영상 획득용 카메라, 시료용 선반 및 카메라 고정용 프레임으로 구성된다. 영상 획득용 카메라로서 ToF 카메라(StarForm Swift, Odos Imaging, Scotland)와 스테레오비전 카메라(ZED, Stereolabs, USA)가 사용되었다. 상기 2대의 카메라를 고정하고자 두께 30mm의 알루미늄 프로파일을 사용한 영상 획득용 프레임을 제작하였다(Fig. 1). 이 때 카메라는 프레임 상부에 고정되고, 카메라로부터 1m 떨어진 지점에 실험 재료가 놓이는 시료용 선반이 설치되었다. 실험 재료의 3차원 영상 측정에 미치는

Fig. 1. A schematic representation for acquiring three-dimensional image used in this study.

Fig. 2. A flowchart of three-dimensional image processing.

Fig. 3. Point cloud data acquired by ToF camera (Left: watermelon, Right: pepper seedlings).

태양광의 복사 효과를 차단하고자 모든 영상은 챔버 내에서 획득되었다.

3. 3차원 영상처리

본 연구에서 3차원 영상처리는 영상 획득, 배경분리, 이상치 제거의 순서로 이루어졌다(Fig. 2). 실험 재료에 대한 3차원 영상은 점구름 데이터(point cloud data, PCD) 형태로 저장된다. PCD는 좌표계에 속한 점들의 집합을 의미한다. 3차원 좌표계에서 이러한 점들은(x , y , z) 좌표로 정의된다. 여기에서 z 값은 임의의 픽셀 좌표

(x , y)에서의 깊이 정보를 나타낸다. 원예산물과 플러그묘의 PCD를 시각화한 영상은 Fig. 3과 같다.

PCD를 기반으로 원예산물의 높이와 둘레, 플러그묘의 평균초장을 추정하려면 3차원 영상에서 실험 재료와 배경의 분리가 필요하다. 실험 재료와 배경의 분리에 실험 재료가 포함된 3차원 영상과 포함되지 않은 3차원 영상에서 화소단위의 z 값 차이를 이용하였다. z 값은 카메라와 실험 재료 사이의 거리 정보를 포함하고 있기 때문에 이를 활용하면 실험 재료와 배경의 분리가 가능하다. 배경 분리의 정확성을 높이고자 스테레오비전 영상

에서는 획득된 디지털 영상을 추가로 이용하였다. 이 때 백색의 시료용 선반과 유색의 물체를 색상으로 구분하기 쉽도록 RGB 좌표의 영상을 HSV 좌표로 변환하였다. 다음으로 HSV 좌표 중 H(hue) 채널을 이용하여 물체를 인식하였다.

PCD를 획득하게 되면 렌즈의 왜곡, 난반사 등의 문제로 잡음이 함께 포함되어 있다. 이러한 잡음은 이후 계산 과정이나 형상 인식에 영향을 줄 가능성이 있으므로 제거해야 한다. Rusu 등(2008)은 k 최근접 이웃 (k -nearest neighbors) 알고리즘을 이용하여 PCD에서 인접한 점들의 거리에 대한 평균(μ)과 표준편차(σ)를 계산하였다. 즉, k 개의 이웃한 점들 중 거리가 $\mu \pm \sigma$ 의 임계값을 초과하면 이상치로 간주하여 제거하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 k 값을 5, 10, 15, 20, 25로 설정한 후 이상치 제거에 적합한 k 값을 결정하였다.

4. 원예산물의 크기 및 플러그묘의 평균 초장 결정

ToF 카메라와 스테레오비전 카메라를 이용하여 획득된 3차원 영상에서 원예산물의 높이는 상단으로부터 하단까지의 수직거리로 정의된다. 또한, 이들의 둘레는 상부에서 내려 보이는 테두리의 길이와 같다. PCD의 거리 정보를 이용한 원예산물의 높이 결정은 식(1)로부터 계산된다.

$$H = L_1 - L_2 \quad (1)$$

여기서, H : 원예산물의 높이, L_1 : 카메라와 시료용 선반 사이의 거리, L_2 : 카메라와 실험 재료 사이의 거리이다.

둘레 측정은 실험 재료의 가장 외곽에 위치한 PCD를 유클리드 거리(Euclidean distance)로 계산하였으며 계산식은 식 (1)과 같다.

$$D = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (2)$$

여기서, L : 원예산물의 둘레, n : 외곽에 위치한 PCD의 수, x, y, z : PCD의 좌표값이다.

농촌진흥청의 농업과학기술 연구조사분석기준(2012)에 따르면 과채류의 초장 측정 기준이 오이와 가지에 대해서만 제시되어 있다. 즉, 오이의 초장은 지체부에서 생장점까지의 총 길이로 정의되었고, 가지의 경우 수확기에 식물체의 지체부에서 가장 높은 지점까지의 길이가 초장으로 정의되었다. 따라서 원예작물의 초장이 극히 일부 작목에 대해서만 제시되어 있을 뿐만 아니라, 정의된 기준조차 동일하지 않음을 알 수 있다. 더구나 플러그묘의 초장이 명확하게 제시되어 있지 않다. 때문에 플러그묘의 생장 지표에 해당하는 초장을 개체 단위로 측

Fig. 4. Definition of modified plant height.

정할 경우 연구자들은 지체부로부터 생장점 또는 최상단 지점까지의 길이를 선택하여 사용한다. 이로 인해서 초장의 측정치가 적용된 선택 기준에 따라 달라지는 바, 플러그묘 생육 판단을 위해서 새로운 측정 기준의 도입이 필요하다.

본 연구에서는 3차원 영상을 이용하여 플러그묘의 초장을 결정할 때 기존의 측정 기준 대신에 수정 초장(modified plant height)을 도입하였다. 수정 초장은 플러그트레이 상단으로부터 본엽의 최고점까지의 거리(L)로 정의된다(Fig. 4). 수박, 토마토 및 고추 플러그묘의 초장은 개체별로 획득된 3차원 영상으로부터 평균 초장을 추정하였다. 아울러 평균 초장의 정확도를 평가하고자 본 실험에 사용된 플러그묘의 초장을 개체 단위로 측정하여 평균값을 비교하였다. 플러그묘의 수정초장은 원예산물의 높이를 구하는 방법과 동일하게 계산하였다. 이 때 추가로 플러그트레이 높이를 제외하였다. 본 연구의 영상 전처리와 거리 정보 추출에 MATLAB(R2019a, MathWorks, USA)이 사용되었다.

3차원 영상으로부터 결정된 원예산물의 높이와 둘레, 플러그묘의 평균초장에 대한 실측치와 추정치를 비교하고자 식(3)을 이용하여 오차를 계산하였다.

$$\text{Error}(\%) = \left| \frac{V_m - V_e}{V_m} \right| \times 100 \quad (3)$$

여기서, V_m : 실측치, V_e : 추정치이다.

원예산물의 높이와 둘레 측정에 스테인레스 직자(SSRP-600, SB Co., Korea)와 줄자(KMC-1600, Komelon Co., Korea)를 사용하였다. 또한 플러그묘의 초장 측정에 캘리퍼스(CD-15CP, Mitutoyo Co., Japan)를 사용하였다. 개체 단위의 측정에서 수박과 토마토 플러그묘는 각각 40주씩 측정하였고, 고추 플러그묘는 50주를 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 3차원 영상을 이용한 원예산물의 둘레와 높이 결정

원예산물의 크기 추정에 앞서서 이상치 제거에 적합한 k 값을 결정하였다. k 값의 변화에 따라 원예산물의 둘레가 다르게 추정되는 바, 둘레 오차의 평균을 적정 k

Table 1. Determination of optimum k-value for k-nearest neighbors algorithm.

Type	k-value	Mean error of circumference (%)
ToF camera	5	1.37
	10	1.32
	15	1.51
	20	1.32
	25	1.30
Stereo vision camera	5	4.68
	10	5.06
	15	4.86
	20	4.18
	25	4.47

값의 선정 기준으로 사용하였다. 단호박을 대상으로 적용된 k 값에 따른 둘레 오차의 평균은 Table 1과 같다. ToF 카메라와 스테레오비전 카메라를 이용하였을 때 오차의 평균은 각각 1.30-1.51%, 4.18-5.06%로 나타났다. ToF 카메라를 이용한 경우의 오차 평균은 k 값이 25일 때 1.30%로 가장 작았으며 20과 10일 때 1.32%이었다. 한편, 스테레오비전 카메라에서는 k 값이 20일 때 4.18%의 가장 작은 오차가 나타났다. 그러므로 본 연구에서는 이상치 제거에 필요한 적정 k 값을 20으로 설정하였다. Fig. 5는 k 값을 20으로 설정한 경우의 단호박 영상에 대한 이상치 제거 결과를 표시한다.

ToF 카메라를 이용하여 획득된 3차원 영상으로부터 결정된 원예산물의 높이와 둘레의 추정치와 실측치는 Table 2와 같다. 둘레에 대한 오차는 오렌지, 단호박, 수박, 사과, 배의 순서로 각각 0.0%, 0.2%, 1.4%, 1.9%, 3.0%로 나타났다. 측정에 사용된 실험 재료 가운데 둘레의 실측치가 630mm로서 가장 큰 수박의 추정치는 621mm로서 오차가 1.4%이었다. 한편, 크기가 상대적으로 작은 사과와 배의 둘레 실측치는 319mm, 368mm이었으며, 오차는 각각 1.9%, 3.0%로 나타났다. 그러므로 ToF 카메라로 획득된 3차원 영상으로부터 추정된 둘레

Table 2. Estimation of circumference and height of horticultural products measured by ToF camera.

Horticultural products	Circumference			Height		
	Measured (mm)	Predicted (mm)	Error (%)	Measured (mm)	Predicted (mm)	Error (%)
Watermelon	630	621	1.4	189	204	7.9
Orange	273	273	0.0	87	87	0.0
Apple	319	313	1.9	88	88	0.0
Sweet pumpkin	511	512	0.2	106	111	4.7
Pear	368	357	3.0	104	104	0.0

Fig. 5. Removal of outliers using k-nearest neighbors algorithm from the point cloud data of sweet pumpkin (Left: before removing, Right: after removing).

Table 3. Estimation of circumference and height of horticultural products measured by stereo vision camera.

Horticultural products	Circumference			Height		
	Measured (mm)	Predicted (mm)	Error (%)	Measured (mm)	Predicted (mm)	Error (%)
Watermelon	630	597	5.2	189	160	15.3
Orange	273	280	2.6	87	89	2.3
Apple	319	299	6.3	88	89	1.1
Sweet pumpkin	511	507	0.8	106	104	1.9
Pear	368	338	8.2	104	96	7.7

Table 4. Estimation of mean plant height and error of plug seedlings.

Type	Seedling	Number of true leaves	Plant height (mm)		Error (%)
			Measured	Predicted	
ToF camera	Watermelon	3 - 4	82±12.6	86±10.1	4.9
		7 - 8	200±25.0	204±25.2	2.0
	Tomato	1 - 2	55± 9.5	58± 9.6	5.5
		3 - 4	66± 7.3	66± 6.4	0.0
	Pepper	12 - 13	239±29.5	240±31.6	0.4
Stereo vision camera	Watermelon	3 - 4	82±12.6	74±13.8	9.8
		7 - 8	200±25.0	187±24.1	6.5
	Tomato	1 - 2	55± 9.5	43± 9.9	21.8
		3 - 4	66± 7.3	59± 9.0	10.6
	Pepper	12 - 13	239±29.5	229±30.1	4.2

에 원예산물의 크기가 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 높이에 대한 오차는 사과, 배, 오렌지의 경우 모두 0.0%로서 나타났고, 단호박과 수박은 각각 4.7%, 7.9%로 나타났다. 크기가 상대적으로 작은 원예산물의 경우 높이에 대한 오차가 없었던 것에 비해서 수박에서는 높이에 대한 오차가 크게 나타났다. 이러한 결과는 수박의 꼭지에 의한 영향으로 판단된다. 향후 수박의 꼭지가 제거된 상태에서 3차원 영상을 획득한다면 높이에 대한 오차가 줄어들 것으로 기대된다.

동일한 실험 재료에 대해서 스테레오비전 카메라를 이용하여 획득된 3차원 영상으로부터 추정된 결과는 Table 3과 같다. 실험 재료의 둘레 오차는 단호박, 오렌지, 수박, 사과, 배의 순서로 각각 0.8%, 2.6%, 5.2%, 6.3%, 8.2%로 나타났다. 한편, 높이에 대한 오차는 사과, 단호박, 오렌지, 배, 수박의 순서로 각각 1.1%, 1.9%, 2.3%, 7.7%, 15.3%로 나타났다. 단호박을 제외하면 스테레오비전 영상으로부터 추정된 둘레와 높이의 오차가 ToF 영상에 비해서 전체적으로 크게 나타났다. 이러한 결과는 본 연구에 사용된 스테레오비전 카메라의 기계적 사양과 영상에 포함된 잡음(noise)으로 인해서 나타난 것으로 추측된다. 수박에서 높이에 대한 오차가 15.3%로서 가장

높게 나타났는데, 이러한 결과는 ToF 영상에서와 마찬가지로 꼭지에 의한 영향으로 판단된다. 스테레오비전 영상을 이용한 실험 재료의 둘레 추정은 단호박을 제외하고 2% 이상의 오차가 나타났다. 대상 물체로부터의 하이라이트(highlights)는 깊이 정보에 영향을 줄 수 있다 (Templin 등, 2012). 단호박을 제외한 나머지 원예산물은 표면이 매끄럽고 광택이 있기 때문에 하이라이트가 생길 수 있고, 이로 인해서 오차가 커졌을 것으로 판단된다.

2. 3차원 영상을 이용한 플러그묘의 평균초장 추정

3차원 영상을 이용한 수박, 토마토 및 고추 플러그묘 평균초장의 실측치와 추정치는 Table 4와 같다. ToF 영상으로부터 추정된 수박 플러그묘의 평균초장은 실측치에 비해서 4mm 높게 나타난 가운데 평균 초장의 오차가 본엽 7-8매인 경우 2.0%, 본엽 3-4매인 경우 4.9%로서 본엽 수가 작을수록 오차가 크게 나타났다. 이러한 결과는 토마토 플러그묘에서도 유사하게 나타났다. 본엽이 3-4매인 경우의 오차는 0.0%이었으나, 본엽이 1-2매인 어린 묘에서는 오차가 5.5%로서 높게 나타났다. 이러한 결과는 ToF 카메라의 화각에 비해서 플러그묘의 크기가 작았기 때문에 획득된 플러그묘 영상에서의 PCD가 줄어들었

기 때문이다. 초장이 작을수록 잎과 지체부 사이의 거리가 줄어들기 때문에 지체부 부근의 배지에 의한 잡음이 PCD에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서 평균초장이 작을수록 오차가 크게 나타난 이유는 획득된 깊이 정보의 양과 배지가 PCD에 미치는 영향으로 판단된다. 또한, 생육 환경에 따라 잎의 전개 각도 또는 처짐 정도가 다를 수 있는 플러그묘의 3차원 영상으로부터 평균 초장을 추정할 경우 오차가 생길 수 있다. 한편, 고추 플러그묘의 평균 초장에 대한 오차는 0.4%로 나타났다.

스테레오비전 영상을 이용하였을 때 공시 플러그묘의 평균초장의 오차는 4.2-21.8%로 나타났다. 원예산물의 둘레 및 높이를 추정한 결과에서와 마찬가지로 ToF 영상에 비해서 스테레오비전 영상을 이용한 경우에 오차가 높게 나타났다. 한편 평균초장의 추정치가 ToF 영상을 이용하였을 때 실측치에 비해서 높게 나타났으나, 스테레오비전 영상에서는 반대로 낮게 나타났다.

본 연구는 ToF 카메라와 스테레오비전 카메라를 사용하여 획득된 3차원 영상으로부터 원예산물의 크기와 플러그묘의 평균초장을 결정하고자 수행되었다. 전체적으로 ToF 카메라를 이용한 3차원 영상으로부터 추정된 원예산물의 크기와 플러그묘 평균초장의 오차가 작게 나타났다. 원예산물의 크기 가운데 실측치와 추정치의 차이가 가장 크게 나타난 것은 스테레오비전 영상을 이용한 수박의 높이로서 29mm의 차이, 즉 15.3%의 오차가 나타났다. 한편, 플러그묘에서 평균초장의 차이가 크게 나타난 것은 본엽 1-2매의 토마토 묘에 대한 스테레오비전 영상으로서 21.8%의 오차에 해당하는 12mm의 차이가 나타났다. 결과적으로 스테레오비전 카메라로부터 획득된 3차원 영상을 이용할 경우 오차가 크게 나타났다. 이러한 오차의 발생 원인으로 본 연구에서 사용된 스테레오비전 카메라의 기계적 사양을 제외하고도 실측치 측정 과정에서의 오차, 3차원 영상처리 단계에서의 실험 재료와 배경의 분리, 이상치 제거 방법 등을 들 수 있다.

스테레오비전 카메라는 91.2°×65.5° (H×V)의 비교적 넓은 화각을 지니고 있었으나, 본 연구에 사용된 실험재료의 크기가 작기 때문에 획득된 전체 PCD 중 원예산물 또는 플러그묘가 차지하는 PCD가 상대적으로 작았다. 때문에 원예산물의 크기와 플러그묘의 평균초장을 추정한 결과 ToF 카메라가 사용된 경우에 비해서 오차가 작게 나타났다. 앞으로, 스테레오비전 카메라를 이용하여 초장을 결정할 때 개체가 아닌 트레이 단위로 플러그묘의 영상을 획득한다면 많은 양의 PCD를 획득할 수 있으므로 추정 오차가 줄어들 것이다.

플러그묘는 육묘 단계에서 트레이 단위로 관리되며, 출하 단계에서도 트레이 단위로 포장되고 있다. 이와 같은 관리 및 출하 과정을 고려할 때 향후 트레이 단위의

묘소질 평가가 도입될 것으로 전망된다. 묘 소질은 묘가 지니고 있는 특성으로서, 작물의 정식 후 생육과 수량에 커다란 영향을 미친다(Markovic 등, 2000; Lee 등, 2012). 소질이 우수한 플러그묘를 재배에 이용하면 정식 단계에서 활착 환경에 쉽게 적응하거나, 재배 과정에서 비료, 농약, 자재, 관리 노력 등을 적게 투입할지라도 수량이 증대되거나, 품질의 향상이 기대된다(Kim, 2000).

이제까지 3차원 영상 정보가 물체 인식, 공정 검사, 디스플레이 등 주로 비농업 분야에서 많이 활용되고 있다. 농업 분야에서 3차원 영상은 식물 표현형 해석에 적용되고 있는 가운데, 작물의 3차원 PCD로부터 잎과 줄기를 분리하는 방법이 제안된 바 있다 (Gélard 등, 2017; Li 등, 2018). 3차원 영상에는 깊이 정보를 포함하여 수많은 정보가 담겨 있다. 3차원 영상정보를 이용하여 작물의 생육 상태를 정확하게 진단하려면 영상 분할과 재현성 관련 기술이 확보되어야 한다(Bassel, 2015).

본 연구를 통해서 3차원 영상을 이용한 원예산물의 크기와 플러그묘에 대한 평균초장 추정의 가능성을 확인하였다. 비록 플러그묘의 종류 또는 본엽 수에 따라 추정 오차가 다르게 나타났으나, 영상정보로부터 이상치를 효과적으로 제거하는 알고리즘이 개발된다면 추정오차가 크게 줄어든 것이다. 향후 3차원 영상에서 대상 물체와 배경의 정확한 분리, 이상치를 효과적으로 제거하는 영상처리 기술은 3차원 영상처리에 기반을 둔 농작업의 자동화 및 로봇화에 활용될 것이다. 예를 들면, 3차원 영상처리 기술의 개발로 인하여 농산물의 크기를 비롯하여 작물 또는 열매의 위치는 물론 농산물의 크기를 정확하게 결정할 수 있다. 이로 인하여 수확용 로봇의 작업 성능이 크게 향상될 것이다. 또한 비파괴적인 방법에 의해서 플러그묘의 평균초장을 트레이 단위로 정확하게 측정할 수 있기 때문에 묘의 생장 및 품질 관리에 소요되는 노력이 크게 절감될 것이다.

결론적으로 3차원 영상처리 기술의 개발은 작물의 생산, 수확, 포장 및 유통에 이르기까지 광범위하게 자동화가 진행되고 있는 농업분야의 발전에 크게 기여할 것이다.

적 요

본 연구는 3차원 영상을 이용하여 원예산물의 크기와 플러그묘의 평균초장을 결정하고자 수행되었다. 3차원 영상을 획득하고자 ToF 카메라와 스테레오비전 카메라를 사용하였다. 본 연구의 3차원 영상 획득용 실험 재료로서 수박, 사과, 배, 단호박, 오렌지의 원예산물과 수박, 토마토 및 고추 플러그묘를 사용하였다. 플러그묘의 평균 초장을 결정하는 지표로서 기존의 측정 기준 대신에 수정초장이 제시되었다. 스테레오비전 영상에 비해서 ToF 영상을 이

용한 경우에 원예산물의 크기와 플러그묘의 평균초장 오차가 작게 나타났다. 꼭지가 있는 원예산물을 제외할 경우 ToF 영상을 이용한 원예산물의 둘레와 높이의 오차는 각각 0.0-3.0%, 0.0-4.7%로 나타났다. 또한, 플러그묘의 평균초장에 대한 오차는 0.0-5.5%로 나타났다. 본 연구를 통해서 3차원 영상을 이용한 원예산물의 크기와 플러그묘에 대한 초장 추정의 가능성을 확인하였다. 더구나, 본 연구에서 시도된 방법은 3차원 영상으로부터 물체와 배경의 효과적인 분리, 이상치의 제거 등에 활용될 것이다.

추가 주제어: 깊이 정보, 3차원 센서, 스테레오비전, ToF 카메라

사 사

본 결과물은 농촌진흥청 공동연구사업(PJ01384401)과 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농림축산식품연구센터지원사업 (717001-07-2-SB210)의 지원을 받아 연구되었음.

Literature Cited

- Bassel, G.W. 2015. Accuracy in quantitative 3D image analysis. *Plant Cell* 27:950-953. doi:10.1105/tpc.114.135061
- Besl, P.J. 1988. Active, optical range imaging Sensors. *Mach. Vis. Appl.* 1:127-152. doi:10.1007/978-1-4612-4532-2_1
- Edan, Y., S. Han, and N. Kondo. 2009. Automation in agriculture. p. 1095-1128. In: Nof, S.Y. (ed.), *Handbook of automation*. Springer, New York, NY.
- Gélard, W., A. Herbulot, M. Devy, P. Debaeke, R.F. McCormick, S.K. Truong, and J. Mullet. 2017. Leaves segmentation in 3D point cloud. p. 664-674. In: Blanc-Talon, J., R. Penne, W. Philips, D. Popescu, and P. Scheunders (eds.), *Advanced concepts for intelligent vision systems*. Springer, New York, NY.
- Grift, T. 2008. A review of automation and robotics for the bioindustry. *J. Biomechatron. Eng.* 1:37-54.
- Kim, Y.H. 2000. Application of biotechnology in the field of agricultural machinery engineering - Development of closed system for transplant production. *J. of the Korean Society for Agricultural Machinery* 25:311-326 (in Korean).
- Kise, M., Q. Zhang, F. Rovira Más. 2005. A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. *Biosyst. Eng.* 90:357-367. doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.12.008
- Lee, J.S., H.I. Lee, and Y.H. Kim. 2012. Seedling quality and early yield after transplanting of paprika nursed under light-emitting diodes, fluorescent lamps and natural light. *J. of Bio-Environment Control* 21:220-227 (in Korean).
- Li, D., Y. Cao, X. Tang, S. Yan, and X. Cai. 2018. Leaf segmentation on dense plant point clouds with facet region growing. *Sensors* 18:3625-3640. doi:10.3390/s18113625
- Ma, Y., S. Soatto, J. Kosecka, and S. Sastry. 2004. Representation of a three-dimensional moving scene. p. 15-43. In: *An invitation to 3-D vision: From images to geometric models*. Springer, New York, NY.
- Markovic, V., M. Djurovka, Z. Ilin, and B. Lazic. 2000. Effect of seeding quality on yield characters of plant and fruits of sweet pepper. *Acta Horticulturae* 533:113-120. doi:10.17660/ActaHortic.2000.533.12
- Nakarmi, A. and L. Tang. 2012. Automatic inter-plant spacing sensing at early growth stages using a 3D vision sensor. *Comput. Electron. Agric.* 82:23-31. doi:10.1016/j.compag.2011.12.011
- Nissimov, S., J. Goldberger, and V. Alchanatis. 2015. Obstacle detection in a greenhouse environment using the Kinect sensor. *Comput. Electron. Agric.* 113:104-115. doi:10.1016/j.compag.2015.02.001
- Rusu, R.B., Z.C. Marton, N. Blodow, M. Dolha, and M. Beetz. 2008. Towards 3D point cloud based object maps for household environments. *Robot. Auton. Syst.* 56:927-941. doi:10.1016/j.robot.2008.08.005
- Templin, K., P. Didyk, T. Ritschel, K. Myszkowski, and H.P. Seidel. 2012. Highlight microdisparity for improved gloss depiction. *ACM T. Graphic.* 31(4):1-5. doi:10.1145/2185520.2185588
- Thilakarathne, B.L.S., U.M. Rajagopalan, H. Kadono, and T. Yonekura. 2014. An optical interferometric technique for assessing ozone induced damage and recovery under cumulative exposures for a Japanese rice cultivar. *Springerplus* 3:89-100. doi:10.1186/2193-1801-3-89
- Vázquez-Arellano, M., H.W. Griepentrog, D. Reiser, and D.S. Paraforos. 2016. 3-D imaging systems for agricultural applications—A review. *Sensors* 16:618-641. doi:10.3390/s16050618
- Viazzi, S., C. Bahr, T. van Hertem, A. Schlageter-Tello, C.E.B. Romanini, I. Halachmi, C. Lokhorst, and D. Berckmans. 2014. Comparison of a three-dimensional and two-dimensional camera system for automated measurement of back posture in dairy cows. *Comput. Electron. Agric.* 100:139-147. doi:10.1016/j.compag.2013.11.005
- Wei, J., J.F. Reid, and S. Han. 2005. Obstacle detection using stereo vision to enhance safety of autonomous machines. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 48:2389-2397. doi:10.13031/2013.20078
- Yin, X., N. Noguchi, and J. Choi. 2013. Development of a target recognition and following system for a field robot. *Comput. Electron. Agric.* 98:17-24. doi:10.1016/j.compag.2013.07.005
- Zhao, Y., Y. Sun, X. Cai, H. Liu, and P.S. Lammers. 2012. Identify plant drought stress by 3D-based image. *J. Integr. Agric.* 11:1207-1211. doi:10.1016/S2095-3119(12)60116-6
- 농업과학기술 연구조사분석기준. 2012. 농촌진흥청.