

Sistemas de bajo coste para la reconstrucción tridimensional de plantas en estadio temprano

ANDÚJAR D, MARTÍNEZ-GUANter J, RIBEIRO A, GERHARDS R,
BENGOCHEA-GUEVARA JM, PETEINATOS G

¹Centre for Automation and Robotics, CSIC-UPM, Arganda del Rey, Madrid 28500, SPAIN

d.andujar@csic.es, jose.bengochea@csic.es, angela.ribeiro@csic.es

²Department of Aerospace Engineering and Fluids Mechanics, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica (ETSIA), Universidad de Sevilla, 41013 Sevilla, SPAIN

martinezj@us.es, manuelperez@us.es

³University of Hohenheim, Otto-Sander-Straße 5, 70599 Stuttgart, GERMANY

G.Peteinatos@uni-hohenheim.de, Roland.Gerhards@uni-hohenheim.de

Resumen: Los algoritmos de procesamiento tridimensional se están expandiendo rápidamente en los programas de fenotipado y en la toma de decisiones para la gestión agrícola. Para su uso práctico es necesario cuantificar el equilibrio entre el coste del equipo, los recursos computacionales necesarios y la fidelidad y precisión en la reconstrucción de los detalles finales. Este estudio examinó las posibilidades de dos sistemas de bajo coste para la reconstrucción de plantas. Los métodos probados fueron un procedimiento fotogramétrico y un método de reconstrucción utilizando un sensor RGB-D Kinect v2. La información fue procesada para la creación de la nube de puntos, lo que permitió la creación de un modelo 3D que representaba cada planta escaneada. Los parámetros medidos a partir del modelo fueron validados con datos de la altura de la planta, índice de área foliar y biomasa seca. El método fotogramétrico mostró un resultado ligeramente mejor en la reconstrucción de los detalles finales. Aunque el uso del algoritmo de procesamiento es relativamente rápido, el uso de información RGB-D es más rápido durante la creación de los modelos 3D.

Palabras clave: Fenotipado, Structure from Motion; RGB-D

1. Introducción

La creación de modelos tridimensionales de plantas puede proporcionar una visión general más detallada de las bases del desarrollo a lo largo del ciclo de vida. La accesibilidad y disponibilidad de esta información permite tomar decisiones más adecuadas y complejas sobre la extracción de los parámetros de la planta a partir de modelos digitales que permiten los procesos de toma de decisiones para la selección de plantas o la gestión agronómica. Los dispositivos electrónicos pueden caracterizar rápidamente los cultivos de una manera no destructiva, precisa y repetible.

Así, pueden medir y caracterizar formas complejas de plantas proporcionando información esencial a los programas de mejoramiento de plantas, necesaria para modificar los rasgos relacionados con la fisiología, la arquitectura, el estrés o el manejo agronómico (Walter et al.,

2015). La creación de modelos 3D mediante sensores capaces de estimar distancias está abriendo nuevas oportunidades en los procesos de fenotipado al aumentar la eficiencia y la precisión (Gibbs et al., 2017). Durante las dos últimas décadas, el uso de diversos sensores de medición ha permitido estimar la distancia entre el sensor y un objeto, lo que permite describir la morfología con gran precisión creando modelos 3D cuando se añade una tercera dimensión debido al movimiento y al desplazamiento del sensor como ocurre con sensores Lidar o ultrasonido (Andújar et al., 2013). Sin embargo estos sistemas carecen de la información del RGB. Se puede añadir color a los modelos mediante la fusión de sensores. La combinación de los dispositivos de detección tradicionales con la información RGB de una cámara es un reto y aún tiene algunas limitaciones. La aparición de nuevos sensores en el mercado procedentes de diferentes sectores abrió nuevos métodos para la caracterización tridimensional de estructuras vegetales. Así uno de los principales sistemas son las cámaras RGB-D que fueron creadas principalmente para la industria del juego. Paulus, et al. (Paulus et al., 2014) evaluó las posibilidades del RGB-D en comparación con un LiDAR de alta precisión para medir las raíces de plantas de remolacha azucarera. Concluyeron que los sensores RGB-D podrían reemplazar sistemas láser en muchos de los escenarios de fenotipado. Andújar, et al. (Andújar et al., 2016) reconstruyó árboles a diferentes velocidades de viento estimando el Índice de Área Foliar (LAI) y el volumen de árboles demostrando el potencial de estos sensores para la reconstrucción tridimensional. Sin embargo, todavía hay algunos problemas que deben ser resueltos, tales como una reconstrucción adecuada de los detalles finales necesarios en algunos programas de fenotipado. En este sentido, en los últimos años ha surgido un nuevo enfoque basado en el uso de fotogrametría digital con cámaras RGB. La visión estereoscópica permite la adquisición de una alta definición. Además, la combinación de cámaras e imágenes mediante técnicas de Structure from Motion (SfM) crea modelos de alta fidelidad.

El objetivo de este estudio fue evaluar la combinación de algunos de los métodos y sensores más novedosos para la reconstrucción tridimensional de plantas en estadio temprano de desarrollo. Los cultivos a caracterizar fueron maíz, remolacha azucarera y girasol. Específicamente se analizaron las capacidades y limitaciones de los diferentes principios y sistemas en términos de precisión para extraer varios parámetros relacionados con la morfología de estos cultivos. La metodología comparó la precisión y las capacidades de los algoritmos de desarrollo para procesar las nubes de puntos para la construcción de modelos tridimensionales.

2. Material y Métodos

La experimentación se realizó en la finca experimental de la Universidad de Hohenheim (Stuttgart, Alemania) donde se probaron diferentes métodos de reconstrucción utilizando cámaras RGB-D y procedimientos de fotogrametría digital en tres cultivos diferentes: maíz (*Zea mays* L.), remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.). Las plantas se encontraban en estadios de desarrollo entre 13 y 19 de la escala BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie) (Landcashire et al., 1991).

El primer método que se utilizó fue de reconstrucción mediante Structure from Motion (SfM) para crear modelos en 3D sobre imágenes RGB. Los algoritmos SfM se aplicaron a un conjunto de imágenes digitales, que fueron adquiridas secuencialmente desde una vista cenital, permitiendo una correcta superposición entre imágenes para crear modelos 3D de alta precisión. En el segundo método se probó un algoritmo de adquisición y reconstrucción utilizando un sensor RGB-D Kinect v2 siguiendo un procedimiento de adquisición de imágenes similar

Reconstrucción tridimensional por fotogrametría

Para la reconstrucción del modelo se utilizó el método de Structure from Motion (SfM). Se utilizó un conjunto de imágenes que cubrían cada planta desde diferentes ángulos de visión. El conjunto estaba formado por aproximadamente 30 a 40 imágenes por muestra buscando una cobertura completa de la planta dependiendo del tamaño de esta. Las imágenes se adquirieron manualmente con una cámara Sony Cyber-shot DSC-HX60 (Sony, Tokio, Japón) siguiendo una ruta concéntrica a tres alturas diferentes. Las imágenes fueron tomadas con una superposición mínima con la anterior del 90%. La cámara se mantuvo a unos 50 cm del tallo de la planta en cada toma.

El modelo fue procesado en el software Agisoft PhotoScan Professional Edition (Agisoft LLC, San Petersburgo, Rusia) versión 1.0.4. para la reconstrucción de los Modelos Digitales de Superficie (DSM) de cada planta. El DSM se construyó en base a la relación entre la posición de la cámara y las imágenes. La proyección de las imágenes y su combinación permite la creación del DSM mediante la búsqueda de puntos comunes en la escena. El proceso crea una densa nube de puntos en 3D, que más tarde se utiliza para la creación del modelo sólido. El tratamiento se dividió en tres pasos automáticos: (1) alineación de imágenes; (2) construcción de la geometría; y (3) generación de las nubes de puntos. Posteriormente, el modelo se escaló manualmente de acuerdo con las escalas gráficas ubicadas alrededor del tallo de la planta.

Reconstrucción tridimensional mediante sensores RGB-D

También se evaluó un sistema basado en un sensor RGB-D Microsoft Kinect® v2. El sensor tiene una cámara RGB de 1080p, una cámara infrarroja (IR) y varios micrófonos. El cálculo de la distancia se basa en el principio de ToF. La distancia se calcula simultáneamente para cada píxel capturado de la escena. Este nuevo modelo Kinect puede adaptar automáticamente el tiempo de exposición del sensor RGB, permitiéndole obtener imágenes más brillantes que la versión anterior. El RGB tiene una resolución de 1920×1080 píxeles, mientras que la resolución de la cámara IR es de 512x424 píxeles. El sensor de la cámara IR cuenta con un campo de visión de 70° horizontalmente y 60° verticalmente para obtener información de profundidad, y puede capturar información desde 0,5 m a 4,5 m. La velocidad de imagen puede ajustarse hasta 30 fps, lo que garantiza la superposición entre las imágenes necesarias para los procesos de reconstrucción.

El proceso de adquisición se realizó con un portátil Intel CORE i7-4710HQ con Windows 7, 16 GB de memoria RAM y una tarjeta gráfica Nvidia GeForce GTX de 2 Gb con una unidad de procesamiento gráfico (GPU). Los datos sin procesar se grabaron utilizando Kinect Studio en modo vídeo. La planta fue escaneada siguiendo una ruta concéntrica, de forma similar a la adquisición de imágenes del sistema anterior. El software de reconstrucción fusiona las diferentes imágenes de profundidad consecutivas y superpuestas. En este procedimiento se desarrolló y utilizó un proceso totalmente automático de superposición de imágenes de profundidad utilizando el algoritmo descrito en (Nießner et al., 2013), con una variante del algoritmo iterativo de punto más cercano (ICP) (Chéné et al., 2012), que mejora la precisión de la nube de puntos.

Seguidamente se realizaron mediciones manuales en cada planta. La altura máxima de cada planta se calculó mediante el método del cilindro extendido desde la base hasta el extremo del tallo principal, indicando así la altura máxima del tallo (Rose et al., 2015). Posteriormente, las plantas se almacenaron en bolsas de papel y se secaron en estufa para la determinación de la biomasa de la planta. El peso de la biomasa se determinó secando las muestras a 78°C durante 48h.

3. Resultados y Discusión

Los sistemas de reconstrucción tridimensional crearon diferentes modelos (Figura 1). Los modelos en todos los casos fueron muy similares a la realidad con pequeños errores que fueron ligeramente diferentes entre los modelos basados en Kinect y los creados por fotogrametría. Aunque en todos los casos los errores aparecieron al final de los bordes de las hojas y ramas, las mediciones del Kinect v2 fueron más imprecisas que las de la fotogrametría. Aunque los últimos detalles finales no se reconstruyeron correctamente, la reconstrucción mostró una alta fidelidad como se muestra en el análisis estadístico.

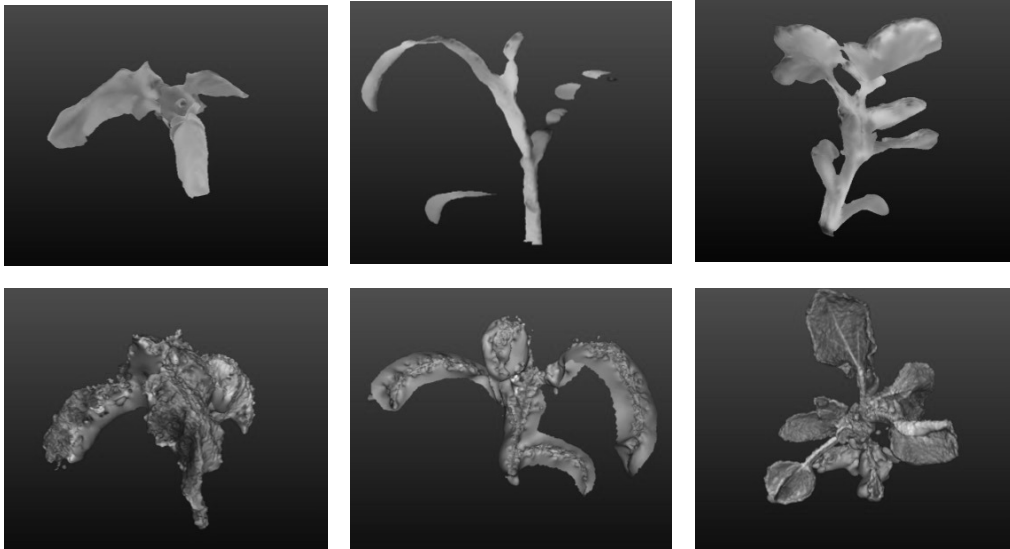


Figura 1. Diferentes ejemplos de plantas reconstruidas desde diferentes ángulos de visión utilizando sistemas basados en Kinect (arriba) y fotogrametría (abajo)

Los parámetros medidos usando los sistemas de modelado mostraron una alta correlación con los datos de la verdad terreno y la biomasa seca. De hecho, se observó una buena consistencia en las ecuaciones de correlación lineal entre los parámetros estimados por el modelo digital 3D y sus valores reales medidos en las plantas (Figuras 2 y 3).

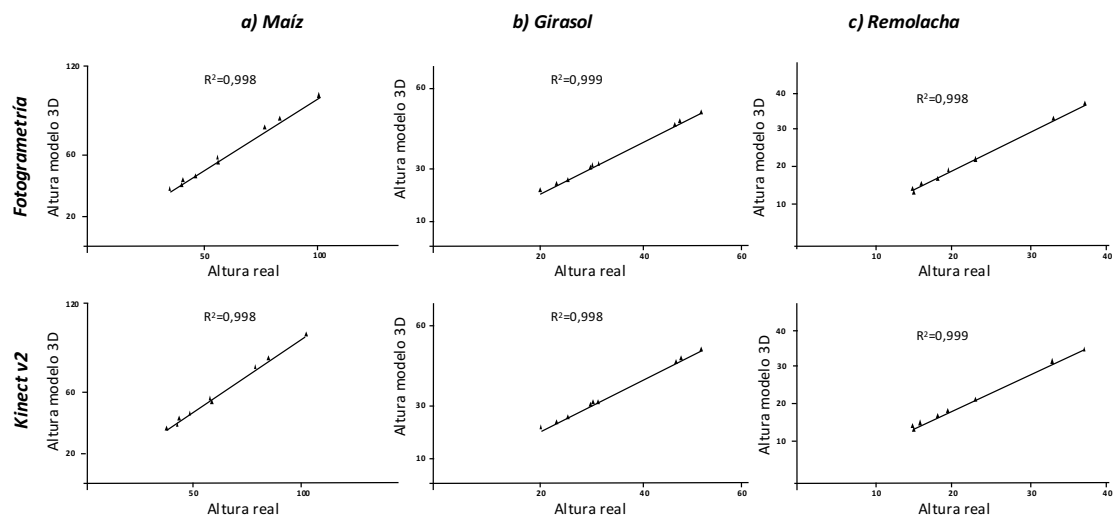


Figura 2. Valores de regresión entre alturas reales y estimadas por los modelos

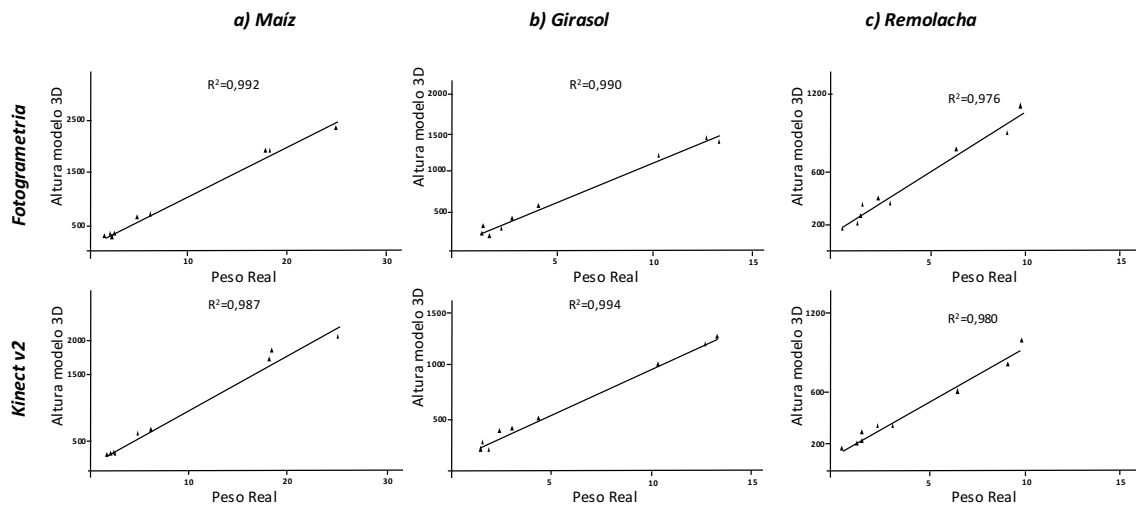


Figura 3. Valores de regresión entre pesos reales y estimados

Aunque los valores generales fueron similares entre ambos métodos tridimensionales, surgieron pequeñas diferencias cuando el cultivo muestreado fue analizado independientemente. Estas pequeñas diferencias pueden deberse al movimiento manual de la cámara y a las áreas ocultas durante el escaneado (Paprocki et al., 2012). Por lo tanto, el detalle final puede mejorarse aumentando el tamaño de la muestra o reduciendo la distancia desde la cámara hasta la planta objetivo. Sin embargo, esta modificación en el proceso de adquisición aumentaría el tiempo de adquisición de datos y el procesamiento de datos.

4. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por los proyectos Ramón y Cajal RYC-2016-20355, AGL2017-83325-C4-3-R, y José Castillejo CAS18/00123 (Ministerio de Economía y Competitividad). La investigación que ha dado lugar a estos resultados ha recibido financiación de RoboCity2030-DIH-CM Madrid Robotics Digital Innovation Hub ("Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. fase IV"; S2018/NMT-4331), financiada por "Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid" y cofinanciada por los Fondos Estructurales de la UE.

Referencias

- ANDÚJAR D, ESCOLÀ A, ROSELL-POLO JR, FERNÁNDEZ-QUINTANILLA C & DORADO J (2013) Potential of a terrestrial LiDAR-based system to characterise weed vegetation in maize crops. *Computers and Electronics in Agriculture* **92**, 11-15.
- ANDÚJAR D, ESCOLÀ A, ROSELL-POLO JR et al. (2016) A LiDAR-Based System to Assess Poplar Biomass. *Gesunde Pflanzen* **68**, 155-162.
- CHÉNÉ Y, ROUSSEAU D, LUCIDARME P et al. (2012) On the use of depth camera for 3D phenotyping of entire plants. *Computers and Electronics in Agriculture* **82**, 122-127.
- GIBBS JA, POUND M, FRENCH AP, WELLS DM, MURCHIE E & PRIDMORE T (2017) Approaches to three-dimensional reconstruction of plant shoot topology and geometry. *Functional Plant Biology* **44**, 62-75.
- LANDCASHIRE P, BLEIHOLDER H, BOOM TVD et al. (1991) A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Annals of Applied Biology* **119**, 561-601.
- NIEBNER M, ZOLLHOFER M, IZADI S & STAMINGER M (2013) Real-time 3D reconstruction at scale using voxel hashing. *ACM Trans. Graph.* **32**, 1-11.

- PAPROKI A, SIRAULT X, BERRY S, FURBANK R & FRIPP J (2012) A novel mesh processing based technique for 3D plant analysis. *BMC Plant Biology* **12**, 63.
- PAULUS S, BEHMANN J, MAHLEIN A-K, PLÜMER L & KUHLMANN H (2014) Low-Cost 3D Systems: Suitable Tools for Plant Phenotyping. *Sensors* **14**, 3001.
- ROSE J, PAULUS S & KUHLMANN H (2015) Accuracy Analysis of a Multi-View Stereo Approach for Phenotyping of Tomato Plants at the Organ Level. *Sensors* **15**, 9651.
- WALTER A, LIEBISCH F & HUND A (2015) Plant phenotyping: from bean weighing to image analysis. *Plant Methods* **11**, 14.

Low Cost Three-dimensional Modelling Systems

Summary: Three-dimensional processing algorithms are expanding rapidly in phenotyping programs and in decision making for agricultural management. It is necessary to quantify the balance between the cost of the equipment, the computational resources required and the fidelity and precision in the 3D reconstruction. This study examined the possibilities of two low-cost systems for plant reconstruction. The methods tested were a photogrammetric procedure and a reconstruction method using an RGB-D Kinect v2 sensor. The information was processed for the creation of point clouds, which allowed the creation of a 3D model representing each scanned plant. The parameters measured from the model were validated with data on plant height, leaf area index and dry biomass. The photogrammetric method showed a slightly better result in the reconstruction of the end details. Although the use of the photogrammetry is relatively fast, the use of RGB-D information is faster during the creation of the 3D models.

Keywords: Plant phenotyping; RGB-D; Structure from Motion.