



X Congreso Ibérico de Agroingeniería X Congresso Ibérico de Agroengenharia

Huesca, 3-6 septiembre 2019



Detección de características de cultivo a través de sensores ópticos en un sistema orgánico de tipo *strip-cropping*

A.M. Krus¹, D.F. van Apeldoorn², J.J. Ramirez¹, C. Valero¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España; a.m.krus@upm.es

² Wageningen University & Research, Wageningen, Países Bajos

Resumen: Hay un mercado creciente para la agricultura orgánica. Sin embargo, la falta de atención a la biodiversidad y la fertilidad del suelo de las prácticas actuales es un tema urgente. En este contexto, el proyecto SUREVEG analiza el cultivo en franjas en la producción orgánica y su implementación en cultivos intensivos para mejorar la fertilidad del suelo y la biodiversidad en toda Europa. Para contrarrestar la mano de obra adicional de un sistema de cultivos múltiples, se propone una herramienta robótica. Dentro del marco del proyecto, se producirá una versión modular de prueba de concepto (POC) que combinará tecnologías de detección con la actuación en forma de un brazo robótico. Este sistema POC se centrará en las necesidades de fertilización, que se identificarán en tiempo real y se aplicarán en una sola planta. Este artículo se centra en la captación de las características del cultivo mediante nubes de puntos obtenidas con dos lidars y en su procesamiento. La segregación en suelo y plantas fue lograda con éxito aplicando funciones de peso, encontrando el valor clave de una manera dinámica por ensayo. Seccionando las nubes de plantas adyacentes mediante el límite nominal se pudo contar las cantidades y así indirectamente los rendimientos esperados por fila.

Palabras clave: lidar; coles; extracción de plantas; función de peso

1. Introducción

Tras la modernización de maquinaria agrícola y con ello el desarrollo de las prácticas agrícolas, en las últimas décadas el enfoque se ha centrado sólo en la productividad, perdiendo así la atención al equilibrio natural del medioambiente. Afortunadamente, hoy en día la demanda de productos orgánicos está creciendo, aumentando la cantidad de agricultura orgánica que se practica [1]. En Europa específicamente, el crecimiento en la demanda junto con unas iniciativas legislativas han aumentado la superficie de cultivo ecológico en los últimos años [2]. La agricultura ecológica optimiza los nutrientes en el suelo y beneficia la biodiversidad, mientras reduce la contaminación de agua, entre otras cosas [3]. El proyecto SUREVEG [4] se enfoca por un lado en los efectos de la agricultura orgánica al suelo, y por otro los efectos de diferentes estrategias de fertilización, aplicándolo por toda Europa. En dicho proyecto la agricultura orgánica está combinada con el cultivo en franjas, también conocido como *strip-cropping*, *mixed-cropping* o *inter-cropping*, el cual también persigue un aumento de la biodiversidad [5], una mejora en el suelo, y una disminución en el uso de los recursos naturales [6,7]. Asimismo, el cultivo en franjas conlleva un aumento del rendimiento productivo [8]. Sin embargo, el aumento en complejidad de su gestión demanda el desarrollo de soluciones nuevas para facilitar el cambio en las prácticas de cultivo.

Últimamente los desarrollos en la robótica en todo el mundo se han aplicado a una amplia gama de situaciones, incluyendo la agricultura [9]. Las máquinas agrícolas de hoy en día son cada vez más avanzadas y las primeras máquinas autónomas (robots) ya han entrado en el mercado comercial [10,11]. Para reducir la compresión del suelo, uno de los tipos de automatización se centra en actuación y detección suspendida de un sistema de pórtico [12], como se recoge entre los objetivos del proyecto SUREVEG. En todo caso, para automatizar cualquier proceso, primero se necesita percibir la situación actual de la aplicación, lo cual en la agricultura se puede referir tanto al estado de las plantas como al suelo o cualquier otro parámetro de interés. Como se resume en [13,14] hay muchas maneras de realizar la detección visual. En este trabajo se emplearon unos sensores de tipo lidar, de manera análoga a trabajos previos [15–17] entre otros. En los datos 3D obtenidos por dos lidars montados en un tractor, las plantas fueron aisladas con el objetivo de calcular sus volúmenes reales de una manera automática. Así, la gestión y las aplicaciones agrícolas (p.ej. fertilización, riego, pulverización, etc.) podrán ser ajustadas al nivel de una planta individual. El desarrollo de estos sistemas automáticos de fácil uso reducirá el umbral tecnológico para que los agricultores puedan adoptar un sistema orgánico de cultivos múltiples.

2. Materiales y métodos

2.1. Situación de las parcelas

Los cultivos experimentales con sistema orgánico de tipo *strip-cropping* están ubicados en los campos de Wageningen University & Research en los Países Bajos. Los datos para este artículo se tomaron en el verano de 2018 sobre franjas de coles de una sola variedad (*Brassica oleracea* var. *capitata* de tipo 'Rivera'). De las 12 franjas consideradas, 8 se encontraban en campos de tipo *strip-cropping* (franjas alternas de coles y de trigo), mientras las demás fueron medidas sobre franjas en campos de monocultivo. Una franja consiste en 4 líneas de coles, y tiene una anchura de 3 metros. En la Tabla 1 se especifica la línea de tiempo de los campos, referida al día del trasplante de las coles. Con respecto a las 9 etapas estándar de crecimiento estipuladas en [18] la mayoría de las plantas estaba en la etapa 6. En el año 2018 las condiciones meteorológicas fueron excepcionales por lo cual el desarrollo de los cultivos fue muy heterogéneo. Por casualidad las medidas coincidieron con un periodo de sequía anormal para la región y el desarrollo de las coles al final de la temporada fue tan heterogéneo que se decidió posponer la cosecha de la mitad de los cultivos unas semanas más. A pesar de las circunstancias climáticas desafortunadas, el desarrollo de las rutinas presentadas en este artículo no se vio afectado.

Tabla 1. Línea de tiempo de los campos medidos, indicando los Days After Transplant (DAT).

Actividad	Fecha	DAT
Trasplantar	14/06/2018	0
Medidas	15/08/2018	62
Cosecha 1	01/11/2018	140
Cosecha 2	27/11/2018	166

2.2. Hardware

El tipo de sensor óptico utilizado es un lidar LMS10x de la compañía SICK AG. Los dos sensores fijaron sobre una estructura de soporte que está montada en un enganche a tres puntos en el frente de un tractor, como ilustra la Figura 1. Las ruedas del tractor ocupan el espacio entre las líneas extremas de cultivos, es decir el tractor va por encima de las dos líneas centrales solo. Usando el sistema de GPS y la auto-conducción disponible, el tractor se movió con una velocidad

continua de 2 km/h. Los datos de los lidares fueron grabados con el software de SICK en un ordenador portátil a bordo.

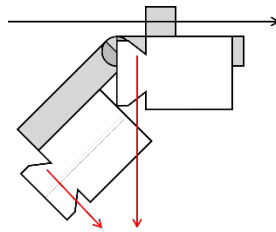


Figura 1. Representación esquemática de la configuración de los dos lidares. La flecha negra es la dirección de movimiento del tractor, las partes grises la estructura de soporte, las figuras blancas son los láseres y con rojo está indicado la dirección central de los barridos.

2.3. Combinación de datos de los lidares

Como en estudios previos [15,19] se eligieron las siguientes inclinaciones para cada uno de los dos lidares empleados: vertical e inclinado 45 grados hacia el frente. Ambos dispositivos fueron fijados en un soporte metálico, por lo cual las nubes de puntos obtenidos por cada lidar tienen una traslación entre ellas que es constante para todas las franjas medidas. La traslación exacta fue deducida de las nubes mismas iterativamente y ello permitió combinar ambas nubes con el objetivo de disponer de una visión más completa de las plantas.

2.4. Identificación de suelo

Para identificar qué puntos pertenecen al suelo y cuáles forman parte de los cultivos, fue calculada una función de peso para cada uno de los puntos. Una función de peso, también conocida como función de coste o función de pérdidas, se puede definir de cualquier forma que delimite las características de mayor interés y es utilizada en muchas áreas de conocimiento en aplicaciones muy distintas. Así, el valor de la función utilizado en este trabajo depende de la altura y cercanía de todos los puntos, registrados por cualquier sensor, que se encuentren en un radio de 150 mm. Cuantos más puntos haya, cuanto más alto estén, y cuanto más cerca se encuentren, mayor será el valor final de un punto en específico. Este criterio se resume en la ecuación Ec. 1, en la cual J_k se refiere al valor de la función de pesos J calculado para el punto k , el índice i describe cada uno de todos los puntos N que haya en el radio mencionado, h se refiere a la altura absoluta, y d a la distancia relativa entre el punto considerado k y el punto en que esté el índice i . Al final, el valor de la función se obtiene por la suma de todos los valores contribuidos por los N puntos dentro del radio.

$$J_k = \sum_{i=1}^N \frac{h_i^2}{d_{ik}} \quad \text{Ec. 1}$$

Por consiguiente, clasificando los valores J en orden ascendente (J_s) los puntos que pertenecen al suelo demuestran un incremento aproximadamente lineal, mientras los puntos que pertenecen a los cultivos tienen valores más altos, rompiendo la tendencia. Dicha tendencia lineal L se puede encontrar usando dos valores bajos, y así abstraer la tendencia L de los valores J_s . Como resultado, los valores alrededor de 0 indican los puntos del suelo, mientras los más altos denotan los puntos de los cultivos. Aquí, el valor cogido como umbral, que define qué valores J cuentan como casi 0 y cuáles como valores altos, es bastante conservativo y fue encontrado empíricamente mirando los datos de todos los 12 campos. Mantener el umbral fijo para todos los conjuntos de datos permite encontrar un límite en J que depende de los datos del campo mismo, aun teniendo un requisito universal. Con el valor J en que la brecha restante suba el umbral fijo se define el valor de peso límite entre suelo y plantas. El cálculo de este valor de corte c está

resumido en la ecuación Ec. 2, en que el subíndice s denota que los valores de J fueron ordenados y el subíndice $[0.05; 0.2]$ se refiere a los percentiles empleados para estudiar la tendencia L . Todos los puntos que cumplan este requisito forman el conjunto m , del que el valor más bajo define el valor de corte c . El umbral empleado al final era un valor de resultante de 50 000.

$$c = \min\{J_m\}, \quad \{m \in (J_s(m) - L_{[0.05;0.2]}(m)) > 50\,000\} \quad \text{Ec. 2}$$

De esta manera la clasificación funciona tanto en los campos en que apenas se ve el suelo como en los campos en que hay pocas plantas.

2.5. Agrupación de puntos de plantas

Las nubes de puntos de plantas son agrupadas por la distancia entre los puntos mismos. En otras palabras, si la distancia absoluta entre dos puntos es menor que 75 mm pertenecen al mismo grupo (misma planta previsiblemente). En las líneas de cultivo en que hubo más marras (huecos sin planta) las plantas no se tocan, por lo que este criterio de agrupación ya es suficiente. Sin embargo, en algunos casos es necesario deducir dónde cortar un grupo. Para identificar en qué grupos es necesario, se superponen las distancias de siembra y la ubicación exacta de las líneas encima de los grupos de plantas, agrupado solo por la distancia de 75 mm. Cada grupo que cubra más que un punto de siembra pasa otra vez por la segmentación con la distancia mínima reducida a la mitad. Los grupos que todavía cubran múltiples puntos de siembra son cortados por la línea en la mitad entre los puntos de siembra.

3. Resultados y discusión

3.1. Regularidad de medidas

Los sensores lidar llevan un contador de barridos realizados que está incluido en los datos registrados. Tras experimentos con algunos métodos de grabación, el registro final fue realizado con el software propio del fabricante. Sin embargo, siempre hay pérdidas de datos y el grado de grabación obtenido en estos registros está listado en la Tabla 1. El porcentaje fue bastante constante con un promedio de 89% en el lidar 1 versus un 87% en el lidar 2. La causa de esta diferencia no ha sido investigada.

Tabla 2. Porcentajes de barridos láser registrado por los dos lidar

Pasada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lidar 1	88.0	89.3	89.8	89.3	88.1	90.1	88.2	88.9	89.8	89.0	89.1	89.3
Lidar 2	86.6	88.7	89.0	88.3	86.0	85.9	87.8	86.8	88.0	87.4	87.1	87.6

3.2. Precisión de la nube de puntos

La velocidad de avance fija de 2 km/h y la frecuencia de medidas de 50 Hz resulta en una precisión teórica de 1.11 cm en la dirección de conducción. La altura de más o menos 1 metro por encima del suelo y la precisión de medio grado de giro del láser resultan en una precisión teórica de 0.9 cm lateral para el lidar mirando hacia abajo. El lidar inclinado 45° tiene una precisión de alrededor de 14 cm, aunque los huecos en las líneas de siembra no fueron registrados en la precisión máxima. Un ejemplo de la precisión de las nubes se muestra en la Figura 2. Por último, los puntos más altos están más cerca al sensor por definición y tienen, en consecuencia, una precisión más alta. La traslación para fusionar las nubes fue deducida empíricamente y las nubes finales fueron centradas para que la línea del lateral $y = 0$ se encuentre entre las dos filas centrales.

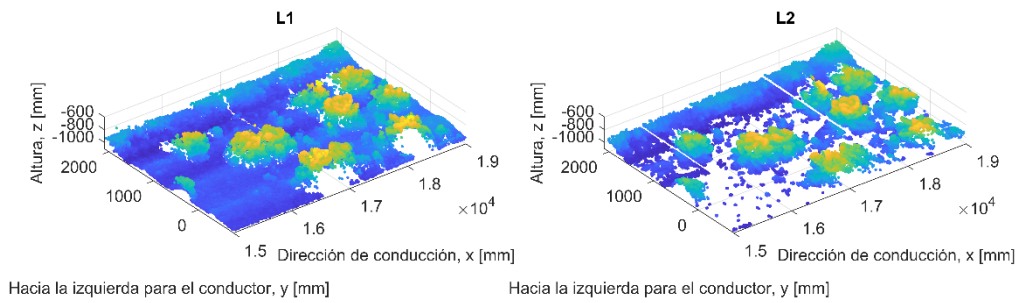


Figura 2. Ejemplo de la precisión de las nubes obtenidas por el lidar vertical (izquierda) versus el lidar inclinado (derecha).

3.3. Valores de la función de peso

Como ya se ha descrito en Ec. 1, cada punto de la nube fusionada está sujeto a la evaluación de la función de peso, para así poder separar el suelo de las plantas, en la que uno es estimado por un ajuste lineal y las otras se componen de los valores que resultan por encima de la tendencia. En las siguientes figuras, Figura 3 y Figura 4, se ilustra el método con los datos de la pasada 1. El valor J de todos los puntos fue calculado y poniéndolos en orden ascendente se obtiene la línea azul de la Figura 3. De los aproximadamente $3.2 \cdot 10^5$ puntos totales, los dos valores en los percentiles 0.05 y 0.2 corresponden a los elementos $0.16 \cdot 10^5$ y $0.64 \cdot 10^5$; estos dos elementos de dicha línea azul son utilizados para formar la base del ajuste lineal L , pintado en rojo. La diferencia entre estas dos líneas, i.e. $(J - L)$, está mostrado en verde en el gráfico de abajo. El umbral conservativo aplicado igual en todas las medidas está indicado con la línea negra (horizontal). El índice de la lista ordenada de los valores J en que coinciden las líneas verde y negro se utilizó para encontrar el valor de J que corresponda, indicado con la línea de corte (vertical). En otras palabras, el valor que tiene la línea azul donde coincide con la línea de corte vertical es el límite para separar la nube de puntos de toda la pasada; los valores encima del límite forman las plantas, mientras los de abajo pertenecen al suelo. En la Figura 4 las alturas presentes en toda la nube se han agrupado en un histograma (azul). Los puntos del suelo están indicados en rojo y los de las plantas en verde. En conclusión, el resultado de la segregación mediante la ecuación de peso es mejor que sólo coger las alturas de los puntos.

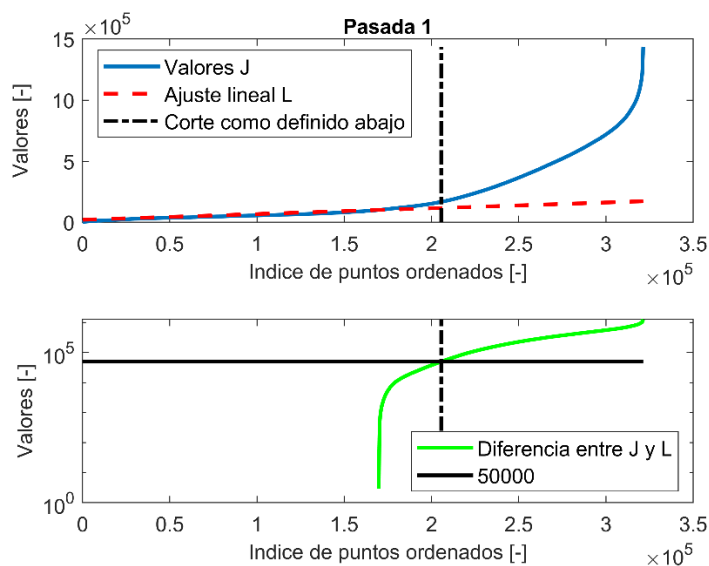


Figura 3. Visualización del proceso de la ecuación Ec. 1.

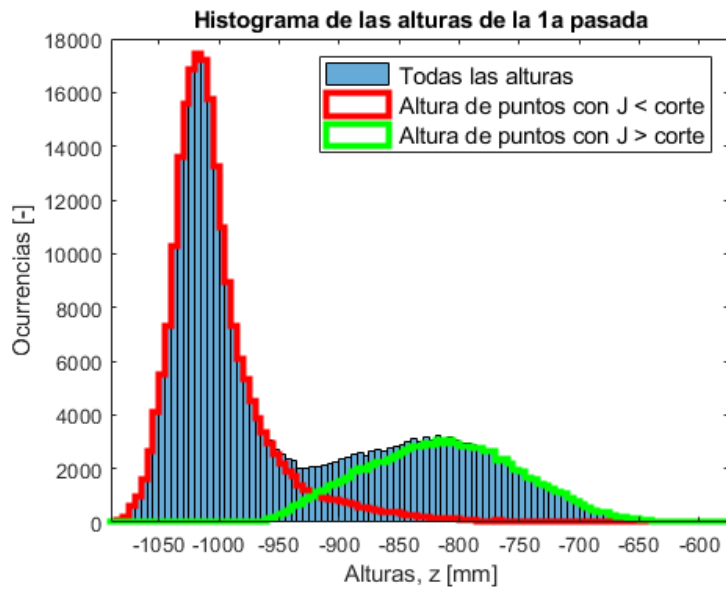


Figura 4. Las alturas presentes en toda la nube de puntos, distinguiendo los puntos del suelo en rojo de los puntos de las plantas en verde.

3.4. Agrupación

En principio, las nubes de puntos de plantas son agrupadas por distancia. En segundo lugar, las ubicaciones teóricas de siembra forman una rejilla superpuesta; cada grupo que toca más de solo un punto medio de los segmentos, i.e. más que un punto de siembra, se seccionó en varios grupos aplicando dicha rejilla. Las filas extremas han sido ignoradas por no tener una cantidad de puntos de medida sustancial por efectos de perspectiva desde la línea de movimiento de los sensores por encima de las filas centrales. Como se puede ver en la Figura 5, en algunos casos los resultados fueron mejores que en otros. Las coles identificadas con número 40 y 41 por ejemplo parecen ser cortadas de forma satisfactoria, mientras la col siguiente está dividida en dos partes, es decir en el grupo 44 y el grupo 45. Por irregularidades de siembra, de crecimiento, o de desarrollo ninguna rejilla preestablecida (siembra teórica) coincide con las coles perfectamente. De momento la división en grupos no ha sido investigada más.

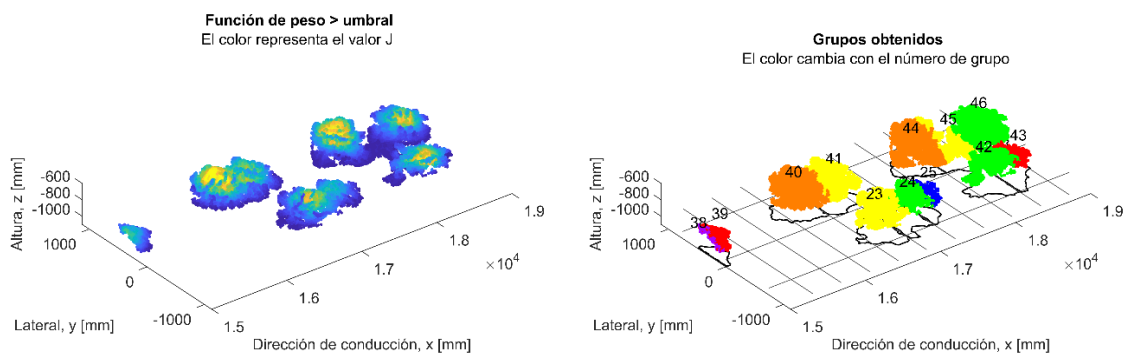


Figura 5. A la izquierda todos los puntos que fueron identificados como coles, a la derecha los grupos obtenidos con el método como descrito. Ojo que el ejemplo cubre la misma zona que en la Figura 2, aunque la fila extrema fue ignorada por no tener la precisión suficiente.

3.5. Correlación con cosecha

En la Tabla 1 ya fue mencionado que pasó mucho tiempo entre las medidas aquí presentadas y la cosecha misma. Desafortunadamente las medidas coincidieron con una sequía excepcional y el desarrollo de las coles ha sufrido por ello, así que el rendimiento productivo final (cosecha de las coles) se refiere a un momento muy posterior a las medidas con lidar. Se han realizado modelizaciones relacionando los pesos cosechados con los volúmenes estimados por los sensores ópticos, pero los resultados distan de ser óptimos.

Sin embargo, las imágenes hechas con drones en la misma semana pueden servir para confirmar los resultados. En la Figura 6 se incluye el mosaico del drone, sin y con la nube de puntos de las plantas de esa pasada. Aunque la resolución deja mucho que desear, sí que se muestra claramente la captura satisfactoria de las filas centrales con los láseres.

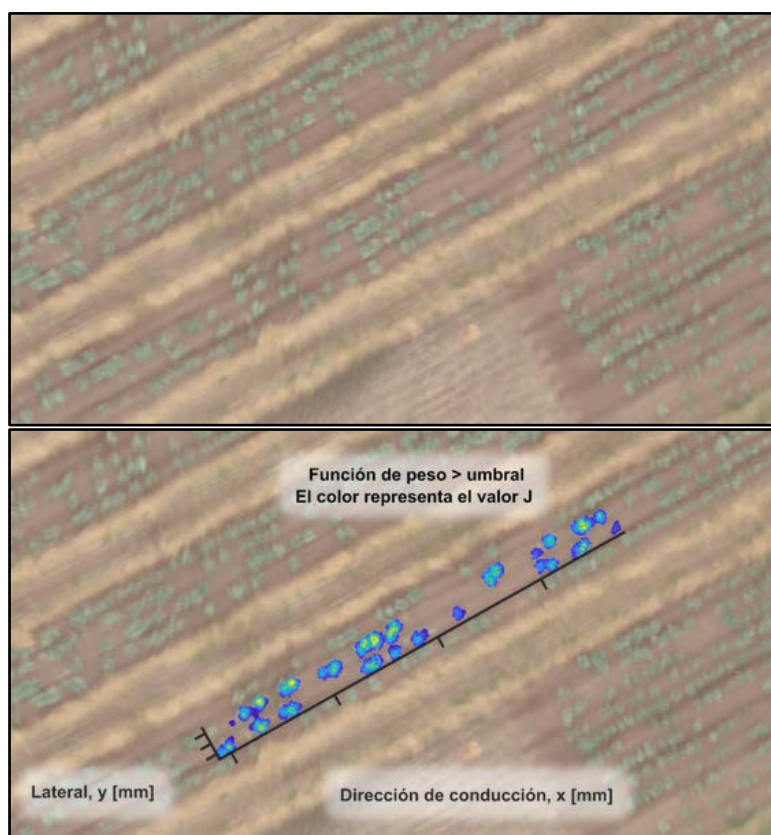


Figura 6. El mosaico del drone (arriba), superpuesto con el resultado del análisis (abajo).

4. Conclusiones

Dos sensores lidar montados en un tractor con guiado automático forman un sistema fácil y rápido de obtener un modelo 3D del estado de los cultivos. La inclinación del segundo sensor añade información al modelo y aumenta la precisión total, aunque la inclinación misma aumenta la distancia entre sensor y objetivo también. Para capturar la altura del suelo el láser vertical es crucial. Por efectos de perspectiva, las plantas más descentradas solo fueron capturadas desde el lado, así que el modelo tiene una calidad mucho más alta en las filas centrales. Una velocidad fija de 2 km/h, una frecuencia de medidas de 50 Hz, y una altura del sensor de aproximadamente un metro resulta en un modelo con una resolución por encima de 1 cm. Para distinguir los puntos de las plantas de los del suelo, la función de pesos desarrollada da buenos resultados, excluyendo las puntas sueltas aunque sean altas mientras sí incluye los puntos bajos de las plantas mismas.

Comparaciones con imágenes de drones de la misma semana confirman el reconocimiento de las plantas en las filas centrales. Un intento de agrupación resultó difícil en las plantas que traslapan. La agrupación en combinación con una temporada de tiempo imprevisto da como resultado que no hay correlación entre las cantidades de plantas encontradas y recogidas, por eso no fueron incluidos en este artículo.

Se recomienda repetir las medidas justo antes de la cosecha para verificar los métodos de agrupación, los cuales dejan margen para investigación adicional, por ejemplo usando los máximos locales de la función de peso. El siguiente paso sería calcular los volúmenes de las plantas individuales encontradas por la agrupación, para así poder deducir la etapa estándar de crecimiento en que estén.

5. Agradecimientos

Se agradece a la Universidad de Wageningen la estancia de Anne Krus y por ofrecernos sus campos de ensayos y sus equipos para medir. En especial, se agradece a P.H. van der Zee por su colaboración en la recopilación de datos y la construcción del enganche para el tractor.

Esta investigación ha sido posible gracias a la financiación del proyecto europeo “Sureveg: Strip-cropping and recycling for biodiverse and resource-efficient intensive vegetable production”, perteneciente a la acción ERA-net CORE Organic Cofund: <http://projects.au.dk/coreorganiccofund/>

Referencias

1. Golijan, J. & Popoviš, A., Basic characteristics of the organic agriculture market. *Competitiveness of Agro-Food and Environmental Economy*. 2016. (p: 239–248).
2. Willer, H., Meredith, S., Moeskops, B. & Busacca, E., *Organic in Europe: Prospects and Developments*. 2018. Research Institute of Organic Agriculture FiBL and IFOAM - Organics International.
3. Kukreja, R. & Meredith, S., *Resource Efficiency and Organic Farming: Facing up to the challenge*. 2011.
4. CORE Organic Cofund, <http://projects.au.dk/coreorganiccofund/research-projects/sureveg/>. Fecha: 04/03/2019.
5. Wojtkowski, P.A., *Biodiversity. Agroecological Economics*. January 1, 2008. Academic Press, (p: 73–96).
6. Exner, D.N., Davidson, D.G., Ghaffarzadeh, M. & Cruse, R.M., Yields and returns from strip intercropping on six Iowa farms. *American Journal of Alternative Agriculture*. 1999, 14(02), 69.
7. Bouws, H. & Finckh, M.R., Effects of strip intercropping of potatoes with non-hosts on late blight severity and tuber yield in organic production. *Plant Pathology*. 2008, 57(5), 916–927.
8. Wang, Q., Li, Y. & Alva, A., Cropping Systems to Improve Carbon Sequestration for Mitigation of Climate Change. *Journal of Environmental Protection*. 2010, 1, 207–215.
9. Blackmore, S., Stout, B., MaoHua, W., Runov, B. & Stafford, J. V., *Robotic agriculture - the future of agricultural mechanisation?* 2005.
10. Slaughter, D.C., Giles, D.K. & Downey, D., *Autonomous robotic weed control systems: A review*. 2007,.
11. Reina, G., Milella, A., Rouveure, R., Nielsen, M., Worst, R. & Blas, M.R., Ambient awareness for agricultural robotic vehicles. *Biosystems Engineering*. 2016, 146, 114–132.
12. Taylor, J.H., *Development and Benefits of Vehicle Gantries and Controlled-Traffic Systems*. *Developments in Agricultural Engineering*. January 1, 1994. Elsevier, (p: 521–537).
13. Li, L., Zhang, Q., Huang, D., Li, L., Zhang, Q. & Huang, D., A Review of Imaging Techniques for Plant Phenotyping. *Sensors*. 2014, 14(11), 20078–20111.
14. Bégué, A., Arvor, D., Bellon, B., Betbeder, J., de Abelleira, D., P. D. Ferraz, R., Lebourgeois, V., Lelong, C., Simões, M., R. Verón, S., Bégué, A., Arvor, D., Bellon, B., Betbeder, J., De Abelleira, D., P. D. Ferraz, R., Lebourgeois, V., Lelong, C., Simões, M. & R. Verón, S., *Remote Sensing and Cropping Practices: A Review*. *Remote Sensing*. 2018, 10(2), 99.
15. Garrido, M., Paraforos, D.S., Reiser, D., Arellano, M.V., Griepentrog, H.W., Valero, C., Baghdadi, N. & Thenkabail, P.S., *3D Maize Plant Reconstruction Based on Georeferenced Overlapping LiDAR Point Clouds*. 2015.

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA
3 – 6 septiembre 2019, Huesca – España

16. Escolà, A., Sebé, F., Miquel Pascual, B., Eduard Gregorio, B., Rosell-Polo, J.R. & Escolà AEscola, A., Mobile terrestrial laser scanner applications in precision fruticulture/horticulture and tools to extract information from canopy point clouds. *Precision Agriculture*. 2017, 18, 111–132.
17. Llop, J., Gil, E., Llorens, J., Miranda-Fuentes, A. & Gallart, M., Testing the Suitability of a Terrestrial 2D LiDAR Scanner for Canopy Characterization of Greenhouse Tomato Crops. *Sensors*. 2016, 16(9), 1435.
18. Andaloro, J.T., Rose, K.B., Shelton, A.M., Hoy, C.W. & Becker, R.F., Cabbage growth stages. *N. Y. Food and Life Sci. Bull.* 1983, (101), 1–4.
19. Martínez-Guanter, J., Garrido-Izard, M., Valero, C., Slaughter, D.C. & Pérez-Ruiz, M., Optical Sensing to Determine Tomato Plant Spacing for Precise Agrochemical Application: Two Scenarios. 2017.