

Sensor óptico para determinar distancia entre plantas para aplicaciones de precisión

Pérez-Ruiz, M.¹, Garrido, M.², Martínez, J.¹, Agüera, J.³, Slaughter, D.C.⁴

¹ Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluido, Universidad de Sevilla, Ctra. Sevilla-Utrera km1 Sevilla 41013, E-mail: manuelperez@us.es.

² LPF-TAGRALIA: Técnicas Avanzadas en Agroalimentación, E.T.S. de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid

³ Dpto. de Ingeniería Rural, Universidad de Córdoba, Campus Rabanales 14014 Córdoba

⁴ Department of Plant Sciences and Biological and Agricultural Engineering, Sensor and Instrumentation Lab, University of California, Davis, One Shields Ave, Davis, CA 95616, USA

Resumen

La automatización en el manejo de la mala hierba de forma individualizada está siendo una realidad cada vez más cercana, tanto objetivos de eficiencia como de beneficio económico se están consiguiendo. En un futuro muy próximo la mecanización y su diseño tendrá que contemplar técnicas de monitorización o detección de precisión. El objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad de un sensor óptico para determinar el espacio entre las plantas de una misma línea de cultivo en diferentes condiciones: laboratorio y campo. Este equipo de trabajo ha investigado la detección del cultivo con un sensor fotoeléctrico de infrarrojo (880 nm) en modo opuesto. La barrera fotoeléctrica de transmisión, usa un par de sensores y al paso de la planta por la cortina de luz interrumpe el haz. La señal de luz se recibe de forma simultánea en tiempo real mediante un sistema de control de alta velocidad. El sensor fotoeléctrico fue capaz de detectar la planta de tomate y por tanto de terminar la separación entre ellas de forma muy precisa. El uso de sistemas de detección como este puede dar lugar a una nueva era que permita el control en la línea de cultivo de la mala hierba de forma más económica y a la automatización de la operación. El control preciso de la mala hierba es un reto importante para este grupo, por ello tenemos previsto seguir trabajando en esta línea.

Palabras clave: detección de tomates, LIDAR, sensor infrarrojo, control preciso de mala hierba

Optical sensor to determine plant spacing for precise application

Abstract

Automation of individual crop plant care in commercial vegetable crop fields has increased practical feasibility and improved efficiency and economic benefit. Its systems approach is taken in the mechanization engineering design by the incorporation of precision sensing techniques. The objective of this study was design-sensing capabilities in an implement for measuring plant spacing under different test conditions: laboratory and field. For that proposal, a photoelectric transmission barrier, by using an optical light curtain transmitter and receiver, evaluated the interruption by the tomato stem of the light curtain, being recorded simultaneously in real-time by a high-speed embedded control system. The optical sensor provided tomato plant detection and therefore the spacing between tomato plants was determined with accuracy. The use of this detection system may result in a new era that allow for an online control of aggressive weeds and the automation of weeding tools, which we plan to pursue through future research.

Keywords: tomato detection, LIDAR, infrared sensor, precise crop protection

Introducción y/o Justificación

Estudios reciente en el sector agrícola han identificado que las principales barreras para conseguir un agricultura sostenible se encuentran en muchas de las técnicas actuales de cultivo y se pone de manifiesto que el sector está inmerso en grandes cambios en la forma de recopilar, analizar, y utilizar la información para conseguir agregar valor a su producción (Fennimore *et al.*, 2010). En los últimos años se han conseguido grandes

retos y se han introducido mejoras sustanciales en lo concerniente a las prácticas agrícolas en los cultivos en líneas (ej. remolacha azucarera, tomate, etc.) (Norremark *et al.*, 2007; Pérez-Ruiz *et al.*, 2012). No obstante, y dada la tendencia a la disminución del proteccionismo agrícola por parte de Europa, es obligatorio reorientar la producción, de forma que estos cultivos sean más competitivos por sí mismos. Desde este punto de vista, la automatización de las tareas de protección de cultivos puede ser el punto de partida de una nueva filosofía productiva, más competitiva, más económica, más eficiente y más respetuosa con el medio ambiente.

En la forma convencional de trabajar en áreas donde no existe o existen poca cantidad de mala hierba, se aplica la misma cantidad de herbicida que en aquellas otras donde la densidad de mala hierba es mayor. Se está trabajando fundamentalmente en dos metodologías para conocer la localización de la mala hierba en el campo: a) detección en tiempo-real basada en sensores y b) la generación de mapas de infestación. Con respecto a esta última metodología, Pérez-Ruiz *et al.*, (2015) presenta los resultados del proyecto RHEA (Robot Fleets Highly Effective Agriculture and Forestry Management) donde se ha conseguido una reducción de herbicida de hasta un 75% del líquido aplicado por hectárea. Estos resultados muestran la viabilidad de uso de los equipos inteligentes de aplicación y abre una nueva era en el control de infestaciones, logrado con la automatización una operación más económica, sostenible y eficiente.

En los últimos 10 años un gran número de trabajos científicos han abordado diferentes tecnologías para la detección de la mala hierba en tiempo real (p.ej. Cope *et al.*, 2012; Weis and Sökefeld 2010; Christensen *et al.*, 2009; Slaughter *et al.*, 2008; Brown and Noble 2005). Algo clave y coincidente en todos los trabajos es la limitación en la adopción del control automático de mala hierba por la falta de un método de detección robusto y asequible. Otros autores han decidido abordar el control automático de la mala hierba localizando los cultivos con precisión centimétrica durante la operación de siembra (Ehsani *et al.*, 2004) o plantación (Sun *et al.*, 2010) utilizando un sistema de posicionamiento global en tiempo real (GNSS-RTK). Así mismo, la localización de forma precisa de la planta de cultivo, además de posibilitar el control automático de la mala hierba, también posibilita un tratamiento individualizado planta a planta (p.ej. fumigación, nutrientes).

En el ámbito de los viveros forestales, Kranzler *et al.*, (1988) desarrolló un contador de árboles en estado de plántula a través de sensores optoelectrónicos. Una cortina de luz formada por varios emisores infrarrojos (LED) a un lado de las plantas y receptores instalados al otro lado y bien alineado con los emisores, producen el bloque del haz de luz al pasar la planta. Este bloqueo permitió contar árboles y los resultados mostrados por estos autores presentaron errores desde el 4% al 58% en el conteo debido a las diferentes configuraciones de los sensores. También en viveros, un estudio más reciente, Garrido *et al.*, 2014 desarrolló una metodología con sensores ópticos para contar el número de árboles existente en una línea de cultivo y además diferenciar los arboles que se encontraban con vida de los muertos.

Los sensores mecánicos para la detección de la mala hierba o cultivo no han tenido grandes avances en últimos 40 años (Garrett 1966). Presentan la gran limitación de uso, necesitan del contacto directo con cada una de las plantas, una operación difícil de realizar a velocidades operativas sin riesgo de daños mecánicos para el cultivo.

El objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad de un sistema de sensores para determinar el espacio entre las plantas de una misma línea de cultivo en diferentes condiciones: laboratorio y campo. Este equipo de trabajo ha investigado la detección del cultivo y ha determinado la distancia entre plantas de una misma línea de cultivo con un sensor fotoeléctrico de infrarrojo (880 nm) en modo opuesto.

Material y Métodos

Plataforma de Laboratorio

La plataforma de laboratorio está formada por 4 elementos esenciales para poder detectar las plantas de tomate y de esta forma estimar la separación entre ellas.

a) Un sensor fotoeléctrico de infrarrojo (880 nm) en modo opuesto. En este modo, el emisor y el receptor están ubicados en posiciones opuestas entre sí, pero alineados, de modo que la luz del primero incide directamente sobre el segundo. La detección se produce por el bloqueo (al menos el 50%), es decir cuando la planta interrumpe el haz de luz emitido. Una pequeña desventaja es que los cables de alimentación y señal que van hacia estos dispositivos no pueden ser los mismos.

Tabla 2. Datos técnicos del Mini-Beam SM31 EL/RL

Características	Interfaces / mecánica / electrónica
Alcance: 30 m	Tipo de salida: Bipolar NPN/PNP
Fuente de luz: Infrarrojo (880 nm)	Alimentación: 12 V DC
Frecuencia máxima: 500 Hz	Calificación ambiental: IEC IP 67
Distancia del haz: \approx 35 mm	Temp. de funcionamiento: -20°C to +70°C

b) Encoder óptico (Grayhill modelo 63R256) para medir posiciones angulares. La resolución del encoder, número de pulsos por cada revolución del eje, es de 256 pulsos. El diámetro del eje sobre el que se mide es de 6,3 mm.



Figura 1. Encoder utilizado en la plataforma de laboratorio para estimar distancia entre plantas (Grayhill 63R256)

c) Para recibir la información procedente del sensor y el encoder se ha utilizado el microcontrolador ATme32u4 (Arduino modelo Leonardo). Este controlador recibe de forma simultánea la señal de bloqueo del haz de los sensores y los pulsos generados por el encoder, mostrando esta información en pantalla y almacenándola en una tarjeta de memoria SD para su posterior procesado.

Tabla 3. Características del microcontrolador ATmega32u4

Microcontrolador	ATmega32u4
Tensión de trabajo	5V
Alimentación	7-12V
Conección	Micro-USB
Entradas analógicas y digitales	5+14

d) Bandeja de transporte de plantas artificiales 3D, simulando a una línea de cultivo. Un motor eléctrico a 12V unido a un sistema de transmisión permite establecer una velocidad lineal de 0,378 m/s de un mecanismo unido con eslabones en el cual se colocan las plantas artificiales separadas cada 10 cm. Las plantas han sido diseñadas en el programa AutoCAD 3D e impresas en la impresora Prusa i3 Hephastos (Mundo Reader S.L., Madrid), el diseño de las mismas ha sido modular, consiguiendo de esta forma la misma geometría de todas las plantas para su estudio en laboratorio.

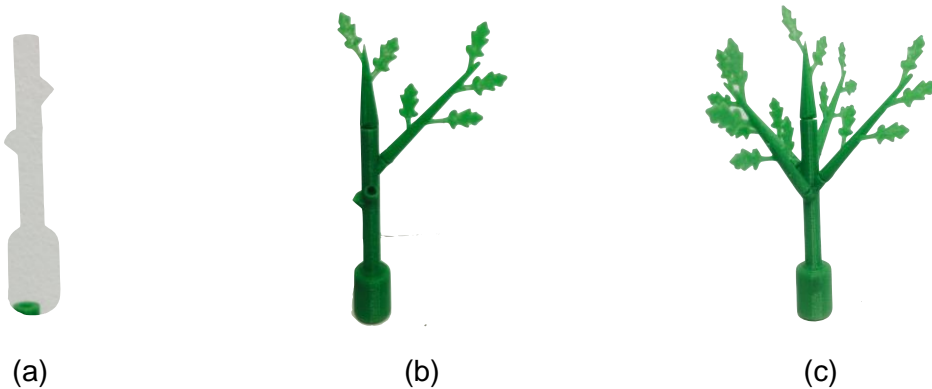


Figura 2. Planta modular 3D utilizada para su detección en laboratorio

Plataforma de Ensayos de Campo

En las medidas realizadas sobre plantas reales (en campo) se ha utilizado el mismo sensor fotoeléctrico de infrarrojo para la detección y el mismo encoder que en laboratorio, por lo que no se procede a su descripción en este apartado. Para los ensayos de campo fue diseñada una estructura de arrastre para colocar y ajustar la pareja de sensores a las condiciones de campo (**Figura 3**).

Para el sistema de adquisición de la plataforma sensorica utilizada en campo, las señales de salida del sensor han sido conectados a un módulo digital bidireccional (NI 9403, National Instruments Co., Austin, Texas, EE.UU.), mientras que la señal del encoder se conectó a un módulo de entradas digitales (NI 9411, National Instruments Co., Austin, Texas, EE.UU.). Ambos módulos se integran en un NI cRIO 9004 (NI 9411, National Instruments Co., Austin, Texas, EE.UU.), y todos los datos se registraron utilizando el programa Labview de National Instruments Co.

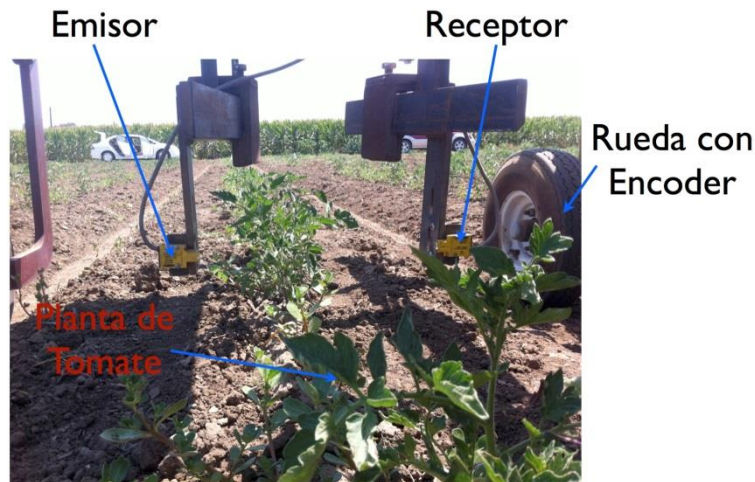


Figura 3. Emisor y receptor fotoeléctrico usado en la plataforma de campo para la detección de plantas de tomate

En estos primeros ensayos de campo, donde se ha puesto en marcha esta nueva metodología para la detección y estimación de la separación entre plantas dentro de una línea de cultivo, se ha trabajado en tres líneas de cultivo de unos 20 m aproximadamente.

Método de caracterización de la planta con el sensor infrarrojo

En el ensayo de laboratorio la altura efectiva de emisor y receptor fue de 4 cm y la altura de las plantas 3D de 13 cm, en el ensayo de campo el sensor fue colocado a unos 12 cm del suelo (altura media de plantas reales 19,5 cm) para evitar obstáculos propios del campo (ej. terrón, leve bache, etc.). El receptor fue configurado para obtener un pulso TTL de salida en cada ocasión que el haz de luz fue bloqueada por alguna parte de la planta. Esta forma de trabajar permite monitorizar y, posteriormente, analizar la distancia entre plantas dentro de una misma línea de cultivo. Para el análisis de los datos registrados en el estudio, fue empleado el programa Matlab (MATLAB R2015b, The MathWorks, Inc., Natick, MA, EE.UU.).

La calibración del sistema fue llevada a cabo mediante el empleo de 33 plantas artificiales en laboratorio y 122 plantas de tomate reales en campo.

La metodología utilizada para la detección del tallo de la planta de tomate con el sensor óptico se basó en los siguientes pasos:

1. Selección de los valores de las variables que utilizara el programa para llevar a cabo la detección de los tallos:

- a. *pulse_distance_relation*: Esta variable nos permitirá convertir los pulsos del encoder en distancias avanzadas por el sistema móvil. En laboratorio el encoder fue acoplado al eje que proporciona el movimiento a las plantas 3D y en campo a una rueda instalada en la estructura sensorica. Los factores de conversión empleados para los ensayos fueron de 1,2 y 0,98 mm por pulso para laboratorio y campo respectivamente.
- b. *detection_filter*: Filtrado de las detecciones registradas por el sensor. La finalidad será la de eliminar posibles erróneas detecciones, sobre todo durante los ensayos

de campo, debido a la interacción de hojas, ramificaciones e incluso malas hierbas. Para ello, se procedió a filtrar toda aquella detección con un longitud o distancia recorrida, mientras el sensor se encontraba activo (detección en forma continua), menor a 4 mm.

- c. *theoretical_plant_distance*: Distancia teórica entre las plantas de una línea de cultivo. El valor fijado durante los ensayos fue de 100 mm y 380 mm para laboratorio y campo respectivamente.
 - d. *expected_plant_distance*: Distancia esperada entre las plantas de una línea de cultivo, siendo su valor la distancia teórica definida anteriormente con un error del 20%.
2. Importación de los datos en bruto registrados por los sensores (encoder y existencia "1" o ausencia "0" de detección por parte del sensor). Conociendo el factor de conversión (*pulse_distance_relation*), se incluye para cada valor de encoder su distancia, en milímetros, correspondiente.
 3. Filtramos los datos mediante la eliminación de toda aquella detección cuya longitud o distancia recorrida, mientras el sensor seguía activo, sea menor al valor fijado (*detection_filter*). De este modo se seleccionaran los posibles candidatos, registrándose para cada detección: la distancia del inicio de la detección; la distancia del final de la detección; distancia recorrida durante la detección; y media de dicha detección, lugar donde se considerara que se encuentra el tallo de la planta.
 4. Evaluación de la distancia entre la media de la detección de dicho candidato con la anterior planta potencial:
 - a. Si esta distancia es mayor al valor fijado (*expected_plant_distance*), consideramos a este candidato como una nueva planta potencial a considerar, registrándose en una nueva matriz: el número de la planta; las detecciones que la conforman; la localización del punto medio de las detecciones; la distancia con la planta potencial anterior.
 - b. Si esta distancia es menor al valor fijado (*expected_plant_distance*), añadiremos los datos de este candidato a la planta potencial anterior, volviendo a calcular de nuevo todas las componentes de dicha planta potencial. Para la selección del nuevo punto medio, se considerara la localización, en donde existe una detección, más próxima al punto medio teórico del nuevo rango de datos.

Resultados y Discusión

Resultados en los ensayos de laboratorio

A modo de ejemplo se muestra la Figura 4a y 4b del ensayo número 3 llevado a cabo en laboratorio. La Figura 4a muestra las posiciones de las detecciones de los tallos de tomate y la distancia estimada entre ellos. En cada uno de los tres ensayos realizados en laboratorio el 100% de los tallos fueron detectados con el sensor infrarrojo. Con la información que transmite la Figura 4a, rápidamente se puede llegar a pensar que abordar algún tipo de actuación entre plantas en una misma línea de cultivo o algún tratamiento sobre la planta sería una actuación muy simple y precisa. No olvidemos que en condiciones de laboratorio no se encuentran obstáculos en la línea de cultivo, situación que dista de lo que podemos encontrar en campo. La Figura 4b nos muestra el

diámetro del tallo medido para una de las plantas del ensayo 3 de laboratorio, valor medio estimado de diámetro 11,2 mm y el valor real del tallo 10 mm.

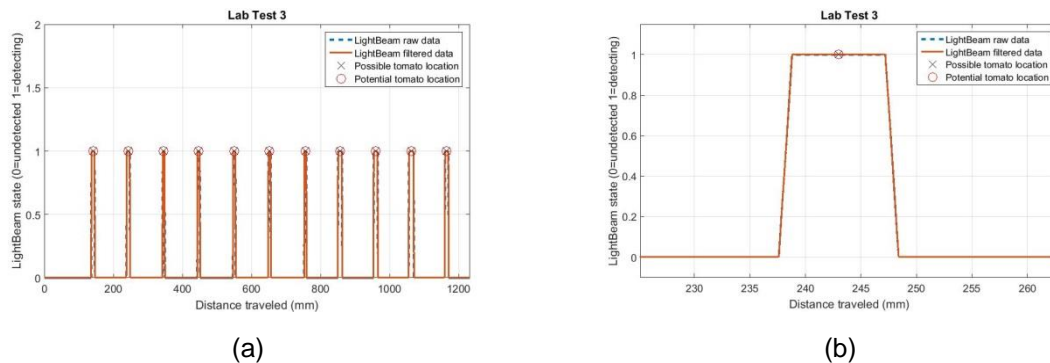


Figura 4. a) Posiciones de los tallos de las 11 plantas en el ensayo de laboratorio número 3 y b) posición media de la planta durante un recorrido de unos 11 mm.

La Figura 5 muestra para los tres ensayos de laboratorio el histograma para las distancias estimadas entre tallo y tallo de planta. La distancia media estimada de tallo a tallo para los tres ensayos es 102,5 mm, la distancia real medida entre plantas es de 100,0 mm. La desviación estándar media para los tres ensayos es de 2,2 mm. Si nos centramos en el ensayo 3, último gráfico en la Figura 5, se observa como todas las distancias entre plantas fueron estimadas entre los valores de 100,1 mm y 103,8 mm.

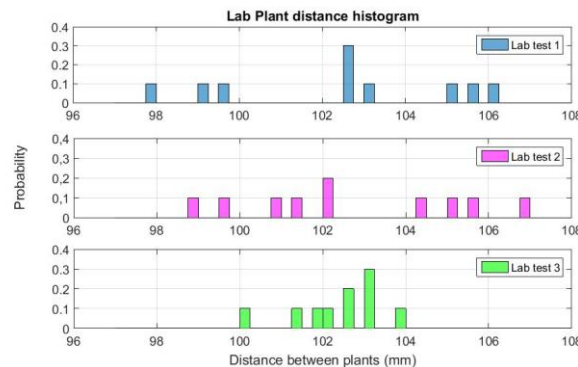


Figura 5. Histograma para las distancias estimadas entre tallo y tallo de planta en laboratorio (mm)

Resultados en los ensayos de campo

A modo de ejemplo se muestra la Figura 6a y 6b del ensayo número uno llevado a cabo en campo. A diferencia con las detecciones realizadas en laboratorio, en los datos registrados y analizados de campo, la distancia determinada entre tallo y tallo presenta mayor variabilidad. Esta variabilidad se produce fundamentalmente por falta de plantas en la línea de cultivo o por encontrar alguna mala hierba muy próxima al tallo de la planta a detectar. En la Figura 6b se observa como se establecen varias posiciones para los posibles candidatos (aspa), siendo la planta potencial sólo una (circulo).

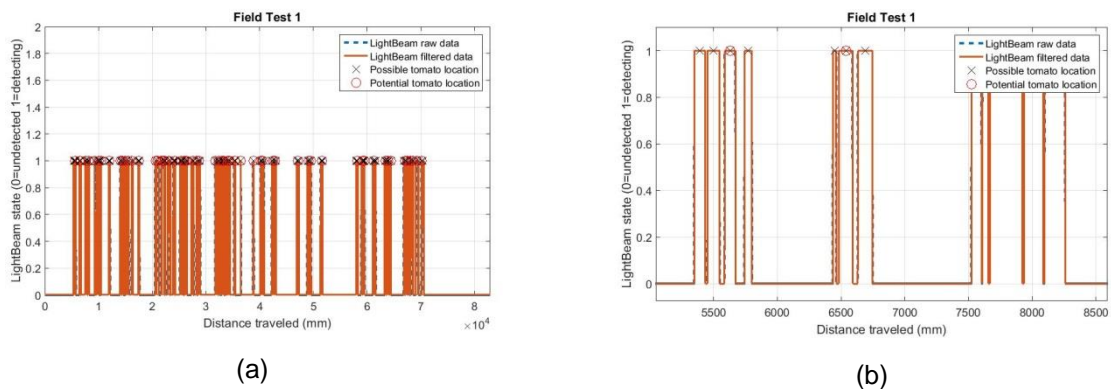


Figura 6. a) Posiciones de los tallos de las 41 plantas en el ensayo de campo número 1 y b) posición de la planta denominada potencial.

Para el ensayo de campo número uno se produjeron 41 detecciones cuando existían 32 plantas reales en la línea de cultivo, esto ha supuesto para este ensayo un error en el número de detecciones del 22%. En cambio en el ensayo número dos se produjeron 32 detecciones de tallos cuando existían 34 plantas reales en la línea, esto significó un 94% de acierto. En el ensayo número tres el acierto fue del 98%.

Tabla 4. Porcentajes de acierto en la detección de tallos en campo

	Plantas Reales	Plantas Detectadas	% Aciertos
Ensayo 1	32	41	78
Ensayo 2	34	32	94
Ensayo 3	48	49	98

Conclusiones

Estos primeros resultados muestran que el uso de un sensor infrarrojo representa una técnica útil para detectar tallo de plantas en líneas y estimar con precisión la distancia entre los tallos. Entre otros logros de este trabajo pueden citarse:

- Construir una plataforma sensórica con éxito para los ensayos de laboratorio y de campo, consiguiendo registrar medidas ópticas (sensor) y posiciones (encoder) de forma simultánea para una línea de cultivo.
- Alto porcentaje (100%) de tallos detectados con éxito con el sensor infrarrojo y en laboratorio, con un valor bajo de error en la localización y por tanto en la distancia estimada entre tallos.
- Un 90% como porcentaje medio de tallos detectados en campo, con una mayor variabilidad en la estimación de distancia entre tallo de plantas.

El uso de sistemas de detección como este puede dar lugar a una nueva era que permita el control en la línea de cultivo de la mala hierba de forma más económica y a la automatización de la operación. El control preciso de la mala hierba es un reto importante para este grupo, por ello tenemos previsto seguir trabajando en esta línea.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado dentro de las actuaciones y con la financiación del proyecto Autonómico de Excelencia “P12-AGR-1227”. Los autores desean expresar su reconocimiento a todos los participantes del proyecto mencionado y al “Precision Agriculture Laboratory” de la Universidad de Sevilla (<http://grupo.us.es/pal/>).

Bibliografía

- Brown, R.B., Noble, S.D., 2005. Site-specific weed management: sensing requirements- what do we need to see? *Weed Sci.* 53, 252-258
- Christensen, S., Sogaard, H.T., Kudsk, P., Norremark, M., Lund, I., Nadimi, E.S., Jorgensen, R., 2009. Site-specific weed control technologies. *Weed Res.* 49, 233-241
- Cope, J.S., Corney, D., Clark, J.Y., Remagnino, P., Wilkin, P., 2012. Plant species identification using digital morphometrics: a review. *Expert Syst Appl.* 39, 7562-7573
- Ehsani, M.R., Upadhyaya, S.K., Mattson, M.L., 2004. Seed location mapping using RTK-GPS. *Trans Am Soc Agric Eng.* 47, 909-914
- Fennimore, S.A., Tourte, L., Rachuy, J.S. Smith, R.F., George, C., 2010. Evaluation and Economics of a Machine-Vision Guided Cultivation Program in Broccoli and Lettuce. *Weed Technology*, 24(1), 33-38.
- Garrett, R. E., 1966. Device designed for synchronous thinning of plants. *Agricultural Engineering* 9, 652-653.
- Garrido, M., Pérez-Ruiz, M., Valero, C., Gliever, C., Hanson, B.D., Slaughter, D.C., 2014. Active optical sensors for tree stem detection and classification in nurseries. *Sensors* 14(6), 10783-10803.
- Kranzler, G. A. 1988. An opto–electronic tree seedling counter. ASAE Paper No. 88–7521, St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Nørremark, M., Søgaard, H. T., Griepentrog, H. W., Nielsen, H., 2007. Instrumentation and method for high accuracy georeferencing of sugar beet plants. *Comput Electron Agric.* 56, 130-146.
- Pérez-Ruiz, M., Slaughter, D.C., Gliever, C.J., Upadhyaya, S.K. 2012. Automatic GPS-based intra row weed knife control system for transplanted row crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 80, Pages 41-49.
- Pérez-Ruiz, M., Gonzalez-de-Santos, P., Ribeiro, A., Fernández-Quintanilla, C., Peruzzi, A., Vieri, M., Tomic, S., Agüera, J., 2015. Highlights and preliminary results for autonomous crop protection. *Comput Electron Agric.* 110, 150-161.
- Slaughter, D.C., Giles, D.K., Downey, D., 2008. Autonomous robotic weed control systems: a review. *Comput Electron Agric.* 61, 63-78
- Sun, H., Slaughter, D.C., Pérez-Ruiz, M., Gliever, C., Upadhyaya S.K., Smith, R.F., 2010. RTK GPS mapping of transplanted row crops. *Comput Electron Agric.* 71, 32-37
- Weis, M., Sökefeld, M., 2010. Chapter 8: Detection and identification of weeds. In: Oerke E-C et al (eds) *Precision crop protection – the challenge and use of heterogeneity*. Springer, Dordrecht, pp 119-134