



Robot de campo para detectar enfermedades en cultivos hortícolas mediante imágenes multispectrales

S. Cubero^{1*}, S. López¹, E. Marco-Noales², S. Sanjuan³, V. Alegre⁴, S. Barbé², C. Ruiz⁴, E. Aguilar⁴, I. Navarro², N. Aleixos⁵, J. Blasco¹

- ¹ Centro de Agroingeniería. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). CV-315, km 10,7 – 46113 Moncada (Valencia), España; cubero_ser@gva.es
- ² Centro de Protección Vegetal y Biotecnología. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). CV-315, km 10,7 – 46113 Moncada (Valencia), España.
- ³ Agrícola Villena S. Coop. Carretera del Puerto, S/N, 03400 Villena (Alicante), España.
- ⁴ TRAGSA. CV-315, km 10,7 – 46113 Moncada (Valencia), España.
- ⁵ Departamento de Ingeniería Gráfica. Universitat Politècnica de València (UPV). Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España.

Resumen: Se ha construido un robot eléctrico asistido por control remoto para inspeccionar cultivos hortícolas mediante teledetección, embarcando tres cámaras réflex (dos modificadas para NIR y BNDVI), una térmica, otra multispectral (ocho bandas entre 550 y 850 nm) y otra hiperespectral (400-1000 nm). Las cámaras están colocadas mirando al suelo (plantas) y para controlar la iluminación se utilizan cuatro focos halógenos en la zona de inspección que ha sido protegida de la luz exterior con una lona. Las imágenes se han georeferenciado utilizando un receptor GNSS (resolución de 3 cm). Para controlar el avance del robot y sincronizar la adquisición de imágenes, se ha desarrollado una placa electrónica a medida utilizando un sensor inductivo acoplado a las ruedas del robot y un software a medida instalado en un computador industrial. Se han realizado inspecciones mensuales en dos parcelas experimentales de zanahorias en Villena (España) para detectar plantas asintomáticas infectadas por *Candidatus Liberibacter solanacearum*. Se han creado mapas del campo utilizando índices vegetativos a partir de los datos espectrales con resoluciones entre 1 y 2,5 mm por píxel. Durante el último ensayo, se etiquetaron 100 plantas que se recolectaron y analizaron utilizando PCR en tiempo real para comparar los resultados con el análisis de las imágenes.

Palabras clave: visión por computador, imagen espectral, agricultura de precisión, teledetección.

1. Introducción

Candidatus Liberibacter solanacearum (CaLsol) es una bacteria que afecta al floema de las plantas. La transmisión de la enfermedad se produce principalmente a través de insectos vectores, aunque también puede ocurrir mediante injertos o semillas [1]. En Europa está causando daños principalmente en cultivos de zanahoria, pero también en patata, apio, chirivía, perejil o hinojo. También otros haplotipos afectan en diversas zonas a cultivos de tomates, pimientos, berenjenas, tabaco, buena hierba o menta. En España está afectando a varias comunidades autónomas causando daños sobre todo en cultivos de zanahoria.

Los síntomas más destacados en estas plantas son las arrugas de las hojas, la clorosis generalizada, la decoloración purpúrea y el crecimiento atrofiado de los brotes y raíces. La enfermedad se muestra en la parte aérea de estos cultivos causando retraso en el crecimiento, aparición de exceso de follaje, clorosis generalizada, coloración purpúrea del follaje con ahuecamiento basal de las hojas e interrupción de la formación de frutos. Sin embargo, los síntomas pueden ser confundidos por aquellos causados por otros patógenos como fitoplasma o spiroplasma citri, y en otros casos, mientras que los frutos están afectados, la zona aérea permanece asintomática, lo que dificulta su detección visual. Por lo tanto, es necesario realizar muestreos frecuentes y análisis de laboratorio para determinar la presencia de la enfermedad en las plantas, lo que resulta difícil y costoso para grandes áreas del cultivo.

El uso de sensores remotos espectrales en agricultura de precisión puede ayudar en este sentido a estudiar grandes extensiones de terreno con una alta resolución para detectar enfermedades de plantas [2]. Estas técnicas han evolucionado durante las últimas tres décadas y actualmente se pueden realizar en diferentes escalas, dependiendo del área a monitorizar y la resolución espacial y espectral requerida [3]. A gran escala, el uso de datos espectrales proporcionados por satélites ha sido utilizado desde hace varias décadas, ofreciendo gran cantidad espectral de información pero con poca resolución espacial y sin posibilidad de programación de la adquisición. Por otro lado, la reducción de precios y la miniaturización hacen que los sistemas aéreos no tripulados (UAV) sean cada vez más populares para una rápida monitorización a nivel de cultivo en cualquier momento. A nivel de hoja, la información espectral se puede recopilar con una alta resolución espacio-temporal utilizando sensores manuales o montados en vehículos agrícolas [4]. Este trabajo tiene como objetivo ayudar en la detección temprana de cultivos infectados por CaLsol a nivel de planta y cultivo, utilizando sensores de detección proximal de alta resolución montados en un robot eléctrico diseñado y desarrollado a medida para este fin.

2. Materiales y métodos

Para lograr el objetivo, se ha creado un robot eléctrico terrestre (Figura 1) operado mediante control remoto en el que se ha embarcado un conjunto completo de sensores capaces de monitorizar campos completos. El vehículo tiene la capacidad de adaptarse al ancho de plantación mediante un sistema telescópico en un rango entre 100 y 200 cm, de forma que las ruedas puedan desplazarse a lo largo del cultivo y del mismo modo al que lo haría cualquier tractor. Además, este sistema permite reducir su tamaño para facilitar su transporte por carretera, ya que el vehículo completamente abierto tiene unas dimensiones mayores a las de cualquier vehículo habitual. Tanto el robot como todos los sensores son alimentados por una batería de polímero de litio (LiPo).

Los sensores están situados en la parte superior central de la zona de inspección, alineados en la dirección de avance del vehículo, de forma que todos ellos puedan capturar toda el área de inspección. Para iluminar dicha zona, se han situado cuatro lámparas halógenas, cada una en una esquina de la escena. Resulta muy recomendable utilizar iluminantes para capturar las imágenes bajo condiciones controladas, evitando los problemas como brillos y sombras causados por las condiciones naturales cambiantes de la luz solar. El uso de lámparas halógenas es necesario para cubrir todo el rango espectral de los sensores e iluminar de forma lo más homogénea posible toda la escena. Sin embargo, dado el alto consumo energético de este tipo de iluminantes (4 x 400 W), resulta necesario utilizar un generador eléctrico que, además de alimentar las lámparas, permite recargar la batería principal del vehículo. Para conseguir unas condiciones de iluminación completamente controladas, toda la zona de inspección ha sido aislada del exterior utilizando lonas alrededor del robot con unas aberturas en las zonas delantera y trasera que permiten el paso de las plantas por dichas aberturas sin dañarlas.



Figura 1. Robot de campo desarrollado

Para capturar las imágenes en los momentos adecuados mientras se desplaza el robot, evitando espacios sin capturar y grandes superposiciones, se desarrolló un sistema programable que permite sincronizar el disparo de las cámaras con el avance del vehículo utilizando dos codificadores ópticos acoplados a las ruedas motrices. Esta señal de los codificadores ópticos también se utiliza para guiar el vehículo a través de un controlador proporcional, integral y derivativo (PID) sobre los motores. Para almacenar las imágenes que proporcionan todas las cámaras, se ha desarrollado una aplicación a medida que se ejecuta en el ordenador industrial.

Para conseguir geolocalizar cada una de las imágenes en el campo, se instaló en el vehículo un receptor GNSS (Hiper SR, TOPCON Corp. Japón) con corrección RTK, que permite identificar cada una de las plantas del cultivo en las imágenes con una precisión de aproximadamente 3 cm.

El conjunto de sensores embarcados en el vehículo terrestre (Figura 1b) incluye tres cámaras DSLR (Digital Single Lens Reflex) (EOS 600D, Canon Inc, Japón), dos de ellas modificadas para capturar imágenes en el infrarrojo cercano (NIR) de 700 a 1000 nm e imágenes BNDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada en el azul), una cámara térmica (A320, FLIR Systems, EE.UU.), una cámara multiespectral (CMS-V, Silios Technologies, Francia) capaz de capturar ocho imágenes monocromáticas en 558, 589, 623, 656, 699, 732, 769 y 801 nm y un sistema hiperespectral de barrido en el rango entre 400 y 1000 nm compuesto por un espectrógrafo (Inspector V10, Specim Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finlandia) y una cámara (Eye5220CP, iDS Imaging Development Systems GmbH, Obersulm, Alemania).

Las cámaras DSLR permiten capturar imágenes del recorte con una resolución de 1 mm / píxel y las cámaras térmica, multiespectral e hiperespectral podrían obtener imágenes con una resolución espacial de aproximadamente 2,5 mm / píxel. Todas las cámaras se configuraron para capturar imágenes sincronizadas aproximadamente por cada metro de avance del vehículo y se utilizaron tiempos de integración de menos de 4 ms para evitar imágenes en movimiento o borrosas.

Los experimentos se han llevado a cabo en un cultivo de zanahoria ubicado en la localidad de Villena, Alicante (España) durante dos temporadas, aunque siguen en curso en 2019. Las líneas rojas delimitan el área monitorizada que contiene 27 filas cultivadas. Dentro de esta área, algunas zonas fueron tratadas con diferentes productos fitosanitarios para prevenir las infecciones. Cada una de las 27 filas cultivadas estaba compuesta por tres líneas de plantas que

hacen un ancho total de 1,5 m aproximadamente que se inspeccionaron al mismo tiempo. En cada una de las dos temporadas que duraron los experimentos ya terminados, se llevaron a cabo seis inspecciones de toda el área, una cada mes durante el ciclo de cultivo desde la siembra hasta la cosecha (junio-noviembre) para observar la evolución de las plantas durante su crecimiento e intentar detectar la enfermedad lo antes posible. Durante el último ensayo de campo, se marcaron 100 plantas con discos rojos para identificarlas posteriormente en las imágenes. Estas plantas se recolectaron por separado una vez monitorizadas por el vehículo y se llevaron al laboratorio para realizar un análisis espectral utilizando un espectrómetro (AvaSpec, Avantes BV, Apeldoorn, Países Bajos) con un rango entre 200 y 1800 nm, un sistema hiperspectral compuesto por una cámara NIR (CoolSnap ES, Photometrics, Tucson, Arizona, EE.UU.) y dos filtros sintonizables de cristal líquido (LCTF) (CRi VariSpec, Waltham, Massachusetts, EE.UU.) en el rango entre 400 y 1100 nm, y también utilizando un sistema de iluminación por fluorescencia visible inducida por luz ultravioleta. Finalmente, se realizó un análisis molecular utilizando la reacción en cadena de la polimerasa en tiempo real (q-PCR) para determinar la presencia o ausencia de infección en las hojas y usar estas plantas como referencia en la creación de modelos estadísticos.

3. Resultados y discusión

El principal resultado ha sido la creación de un robot operado mediante un control remoto que es capaz de embarcar diferentes equipos de teledetección para inspeccionar cultivos hortícolas, iluminando la escena para evitar la radiación solar directa. El robot avanza a una velocidad precisa, sincronizando la adquisición de datos, y permite la creación de mapas precisos de alta resolución de los cultivos. A partir de las imágenes de alta resolución recogidas por cada cámara de todo el cultivo, se crean mapas uniendo todas las imágenes con todas las bandas espectrales disponibles. En la Figura 2 se observa una imagen de una de las filas cultivadas en las distintas bandas y con los diferentes índices espectrales.

Los resultados de los análisis de campo realizados en estos dos primeros años de ensayos no muestran signos claros de CaLsol en la información espectral adquirida durante el período de monitorización. Sin embargo, no se obtuvo información de las muestras negativas para poder compararlas en las imágenes, ya que la gran mayoría de las muestras presentaron resultados positivos en la detección de la bacteria CaLsol. Los resultados del análisis de laboratorio (tanto espectral como molecular) junto con el análisis de estas plantas específicas capturadas en el campo, servirán para crear mapas de cultivos con diferentes índices vegetativos que muestren infecciones potenciales que se compararán con la información recopilada por la Unidad de Bacteriología del IVIA y la inspección visual proporcionada por los técnicos de la cooperativa Agrícola Villena.

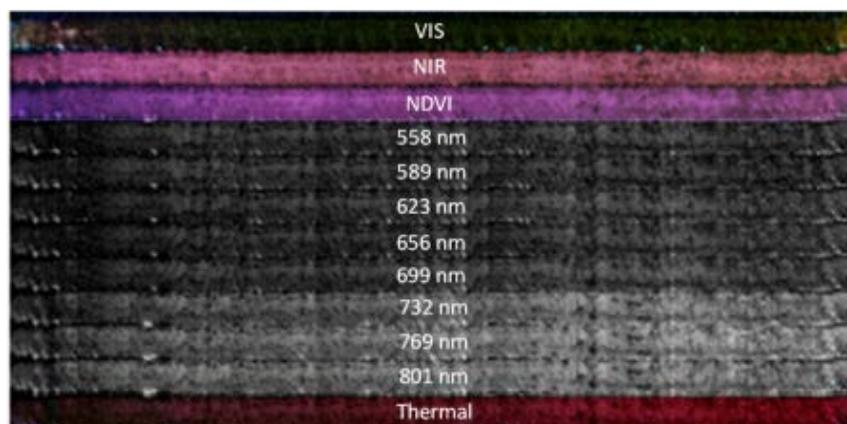


Figura 2. Imagen de una fila capturada en diferentes bandas espectrales

La Figura 3 muestra uno de los mapas que se han creado de todo el cultivo, en este caso utilizando el índice de vegetación NDVI. En el recuadro se observa la alta resolución de 2,5 mm/píxel de las imágenes. Estos mapas se compararon con las inspecciones visuales, pero no se pudieron lograr resultados ya que no se encontró relación entre los síntomas apreciables en la inspección visual y las plantas infectadas. En 2017, los resultados del análisis molecular de estas plantas específicas alcanzaron el 97% de la infección en las muestras recolectadas en una parcela de ensayos con síntomas claros de la infección. Sin embargo, en otra parcela visualmente asintomática, la infección alcanzó el 100% en las muestras recolectadas. Además, las plantas no tenían síntomas visibles claros de la enfermedad en el campo, excepto cuando se observaban con detenimiento, y en ocasiones, los síntomas aparecieron durante las últimas etapas del crecimiento de la planta, aproximadamente un mes antes de la cosecha.

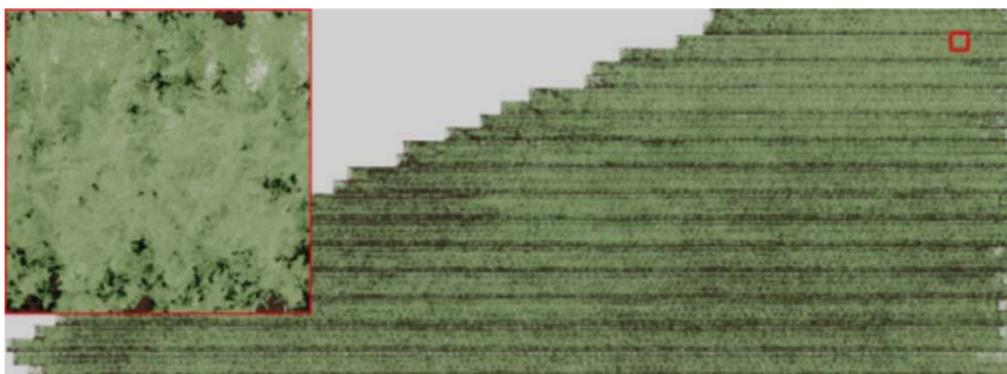


Figura 3. Mapa del cultivo utilizando el índice NDVI y detalle de resolución

Al final de la campaña se recolectaron 100 plantas de muestra, se llevaron a laboratorio para tomar imágenes con diferentes sensores y posteriormente se realizó un análisis molecular. También se realizó el análisis de los datos espectrales recopilados en el campo con algunas de las cámaras de las mismas plantas, pero los resultados de la detección correcta de las plantas infectadas fueron de alrededor del 57%, lo cual es claramente insuficiente para indicar que esta infección en particular puede detectarse utilizando el equipo de detección remota.

Los datos de las cámaras termográfica e hiperespectral ofrecen una alta cantidad de información espectral pero todavía no han sido analizados, por lo que no es posible decir con rotundidad si se puede o no detectar la infección de forma remota. Durante este 2019 se están realizando nuevos ensayos con el vehículo y todos los sensores para tratar de obtener una mayor cantidad de datos, así como la previsión de realizar un análisis molecular en diferentes momentos de la temporada y con un mayor número de plantas geolocalizadas en la parcela y en las imágenes para tratar de establecer una relación entre la información espectral obtenida por los sensores y las plantas que se encuentren afectadas por la enfermedad.

4. Conclusiones

Uno de los principales retos de este trabajo era crear un vehículo o robot eléctrico conducido a través de un mando por control remoto que permitiera embarcar diferentes sensores ópticos para monitorizar cultivos hortícolas en condiciones de iluminación controladas.

La alta resolución de los sensores permite obtener información con una resolución espacial de entre 1 y 2,5 mm por píxel, mucho mayor que la obtenida con sensores embarcados en drones, permitiendo un análisis a nivel de hoja y no a nivel de planta como logran estos últimos. Además, gracias a la información espectral que proporcionan los sensores utilizados, es posible crear mapas utilizando multitud de índices espectrales basados en algunas de estas

bandas espectrales obtenidas. Estos índices resultan muy útiles para la estimación de características de la vegetación y ofrecen información del estado en el que se encuentra. Toda la información recopilada del cultivo ha sido posible referenciarla geográficamente gracias a un receptor GNSS con corrección RTK que permite una gran precisión en la creación de mapas.

Los ensayos realizados en parcelas de zanahorias presumiblemente afectadas por la bacteria CalSol, han permitido la creación de una base de datos de imágenes y mapas espectrales que pretenden seguir ayudando en la detección de la enfermedad de forma remota. Durante este año se esperan conseguir resultados comparando la información espectral con la obtenida a través de los análisis moleculares y la inspección visual para tratar de establecer relaciones ente las imágenes y la enfermedad y ofrecer, de forma no destructiva, una alternativa en la detección precoz de las plantas que pudieran estar afectadas por la enfermedad.

5. Agradecimientos

Este trabajo está parcialmente financiado por fondos de la Unión Europea a través del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 bajo el proyecto N°. 635646 POnTE (Pest Organisms Threatening Europe).

Referencias

1. Antolinez CA., Fereres A., Moreno A. Risk assessment of 'Candidatus Liberibacter solanacearum' transmission by the psyllids *Bactericera trigonica* and *B. tremblayi* from Apiaceae crops to potato. *Scientific Reports*. 2017. 7, article number: 45534
2. Vicent A., Blasco J. When prevention fails. Towards more efficient strategies for plant disease eradication. *New Phytologist*. 2017, 214 (905-908)
3. Martinelli F., Scalenghe R., Davino S., Panno S., Scuderi G., Ruisi P., Villa P., Stroppiana D., Boschetti M., Goulart LR., Davis CE., Dandekar AM. Advanced methods of plant disease detection. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2015, 35 (1-25)
4. Rey B, Aleixos N, Cubero S, Blasco J (2019) XF-ROVIM. A field robot to detect olive trees infected by *Xylella fastidiosa* using proximal sensing. *Remote Sensing. Special Issue Advances in Remote Sensing Applications for the Detection of Biological Invasions*, 11(3), 221. DOI: 10.3390/rs11030221. Open access