

CLUB OF BOLOGNA 21ª Reunión Plenaria

# LA VISIÓN ARTIFICIAL: UNA TECNOLOGÍA VERSÁTIL PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LAS MÁQUINAS AGRÍCOLAS

Entre las ponencias presentadas en la Reunión Plenaria del Club de Bologna, celebrada en el marco de la última EIMA, la desarrollada por el Dr. Jens Möller, de Claas Agrosystems GMBH & CoKG, analizó los sistemas de visión artificial para la automatización de las máquinas agrícolas, que puede ser de gran interés para los lectores de **agrotécnica**, por lo que se ha elaborado una síntesis.

*Las imágenes que ilustran este artículo son las presentadas en la Ponencia.*



**PROF. LUIS MÁRQUEZ**  
**PROF. ETTORE GASPARETTO**  
MIEMBROS DEL COMITÉ DE DIRECCIÓN

## ■ Introducción

Hay una tendencia a máquinas agrícolas cada vez de mayor tamaño, que comienza en el siglo XX, y que continúa en el XXI, las cuales demandan mayor automatización. Es un mercado creciente, que incrementa los costes de fabricación de la maquinaria, pero que puede resultar rentable si permite reducir el consumo de energía y agroquímicos necesarios en la actividad agrícola, así como mejorar la calidad de las cosechas.

El desarrollo de la tecnología de automatización para la maquinaria agrícola tiene muchos

aspectos. Cuando se demanda un alto grado de automatización es importante que los fabricantes de la máquina lo consideren desde el momento en que comienza su diseño en lo que respecta a la mecánica y a la electrónica. Los fabricantes tienen que suministrar los interfaces necesarios que garantizan el funcionamiento del conjunto y no solo de los componentes individuales. Con el aumento del nivel de automatización la complejidad se incrementa.

La emergencia de tecnologías de visión extensamente disponibles ha permitido a los fabricantes automatizar una amplia gama de tareas. Sin embargo, aunque la tecnología de visión artificial se ha desarrollado de forma generalizada, se requieren

esfuerzos especiales para hacer esta tecnología robusta y madura, adaptándose a lo que demandan los agricultores más tecnificados. El hardware debe adaptarse a las condiciones extremas del medio agrícola; el software debe resolver tareas complejas como consecuencia de las variaciones de las cosechas naturales y la diversidad de medio en el que se trabaja. El sistema debe tener una configuración y un interfaz que sea cómodo de manejar por parte del usuario.

Dos son las áreas a las que se pueden aplicar los sistemas de visión artificial: el control de la maleza y los sistemas de autoguiado.

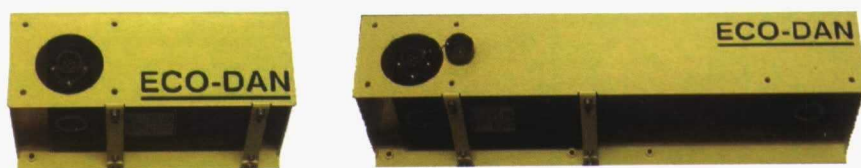
## El control de las malas hierbas

La preocupación por el impacto medioambiental que se deriva de la aplicación de los fitosanitarios ha aumentado el interés para controlar las malas hierbas recurriendo a sistemas mecánicos mejorados con respecto a lo que ha sido la escarda mecánica convencional. Además de las limitaciones impuestas por la legislación, ha crecido el interés por hacer aplicaciones de herbicida localizadas en los focos en las que se desarrollan las malas hierbas. Para ello se puede utilizar la tecnología de visión artificial en color y dos dimensiones (2D-color) que permite aplicar el producto en la interfila y entre plantas de la misma fila.

### • Visión artificial en dos dimensiones (2D)

La utilización de esta tecnología de visión sobre los cultivos comienza a finales de los años '90. Una de las primeras cámaras desarrolladas con este fin, adaptada al medio agrícola, fue la ECO-DAN, que incorpora uno o dos sensores CMOS de color con capacidad para el procesamiento de las imágenes.

FIGURA 1.- CÁMARAS DE ECO-DAN

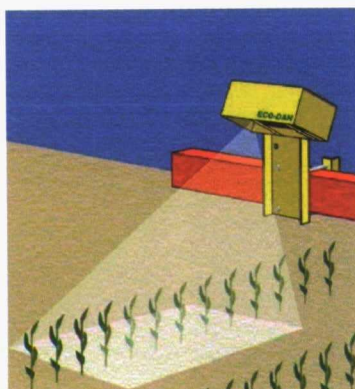


El modelo de la izquierda (Figura 1) se introduce en 1999; la cámara dual (derecha) en el 2001. Contiene un sensor CMOS de color con una resolución de 640 x 480 píxeles. La imagen se maneja mediante un procesador digital de la señal (DSP) a una velocidad de 10 imágenes por segundo, y va unida al resto de la instrumentación mediante CAN-BUS.

El sistema captura imágenes en dos dimensiones de las escenas del campo y las analiza buscando la estructura de las líneas de cultivo (Figura 2).

Analizar estas imágenes es una tarea muy compleja, ya que influyen las características del cultivo, como la altura, el desarrollo foliar, y los cambios de color que se producen a lo largo del ciclo. Inicialmente las plantas aparecen como filas de puntos pequeños entre puntos aleatorios correspondientes a las malas hierbas. Posteriormente estos puntos se funden para formar una línea verde clara. En algunos cultivos las líneas aumentan en anchura y tiende a ocupar la interlínea.

FIGURA 2.- CAPTURA DE IMÁGENES CON ECO-DAN



Además, en el crecimiento de la planta influyen la evolución del estado del suelo, con la disponibilidad de agua y nutrientes, pero también otros factores físicos, químicos y biológicos.

La segmentación de imágenes de color en la cosecha, malas hierbas y suelo es complicada por el hecho que la apariencia de objetos varía con la naturaleza de la iluminación, la textura de la superficie y la forma del objeto.

El color de los objetos cambia a lo largo del día desde la salida del sol hasta el ocaso; cuando los cielos están despejados o se van cubriendo de nubes. La iluminación también cambia con la dirección en la que se trabaja con respecto a la iluminación, que puede ser a contraluz o a favor de esta, lo que puede ocasionar sombras debidas a la presencia de árboles, al apero e incluso a la propia instrumentación. La cantidad de malas hierbas varía según las diferentes zonas de la parcela, así como su estructura y su situación en la interfila. Todo esto se pone de manifiesto en las figuras 3, 4, 5 y 6.

### • Escarda mecánica en la interfila y sobre la línea de plantas

Durante la última década algunos fabricantes europeos están ofreciendo cultivadores con cámaras para su guiado automático (Figura 7). Los componentes básicos en un equipo para la escarda entre líneas son la cámara, el módulo de control (ECU), el sensor de posición y los componentes hidráulicos.

La ECU establece la posición en función de la información que

FIGURA 3.- REMOLACHA AZUCARERA. VARIACIÓN DE LA IMAGEN A MEDIDA QUE SE CIERRA EL CULTIVO



recibe del sensor y de la posición en la que se encuentra el actuador hidráulico. La cámara está situada sobre el bastidor del

cultivador para que siga una de las líneas del cultivo. Los algoritmos de visión ofrecen la información para hacer que el basti-

dor cambie de posición de forma que la cámara se centre sobre la línea. El desplazamiento se consigue, bien por la deformación de un paralelogramo, por el efecto de los discos de guiado o mediante el cambio de la distancia entre brazos del cultivador. Un sistema típico proporciona una precisión de  $\pm 3$  cm en condiciones de funcionamiento normal con velocidad de referencia de más de 10 km/h.

Recientemente el concepto de cultivo entre líneas se ha extendido, con el Robocrop InRow de Garford (Figura 8), para poder eliminar la vegetación entre las plantas de la misma línea. Además de las rejas normales para la escarda mecánica entre las líneas, se utilizan escardillos que trabajan alrededor de cada una

FIGURA 4.- CAMPO DE MAÍZ. EL COLOR DEL PÍXEL VARÍA CON LA INTENSIDAD DE LA ILUMINACIÓN



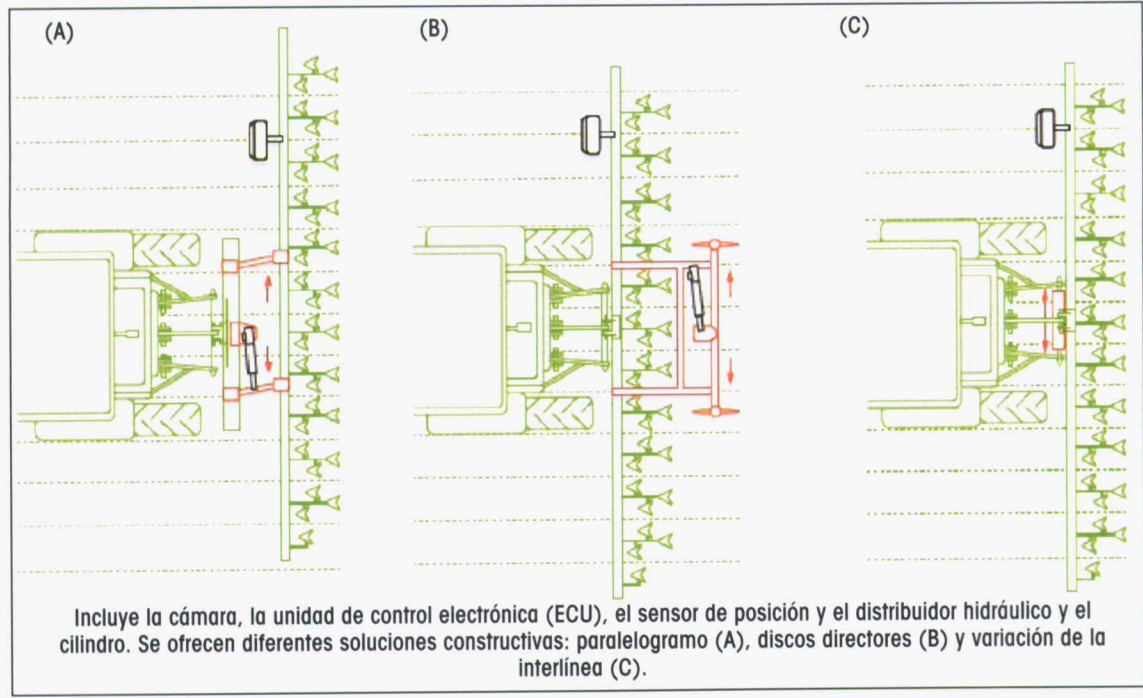
FIGURA 5.- CAMPO DE MAÍZ. LAS SOMBRAS CAUSAN LAS VARIACIONES EN LOS VALORES DEL PÍXEL. LAS SOMBRAS VIENEN DE LOS ÁRBOLES PERO TAMBIÉN DEL APERO, DEL TRACTOR Y DE LA PROPIA CÁMARA



FIGURA 6.- PRESIÓN DE LAS MALAS HIERBA, QUE VARÍA EN LAS DIFERENTES ZONAS DEL CAMPO. LAS PLANTAS CON COLOR VERDE MÁS INTENSO CORRESPONDEN LA CULTIVO



FIGURA 7.- COMPONENTES DEL SISTEMA EN UN CULTIVADOR DE ESCARDA AUTOGUIADO



de las plantas de la línea. La velocidad de rotación de los escardillos se ajusta en función de la variación del espacio entre las plantas.

Los componentes del sistema son similares a los que se utilizan para la escarda en la interfila, aunque la complejidad del sistema es superior como consecuencia de que se la agrega otro grado de libertad. Para tener el éxito con el sistema, los algoritmos de visión deben proporcionar la situación de la plan-

ta en la fila y la situación de las plantas individuales. Las prestaciones nominales son de 2 plantas por segundo y por fila, eliminado la maleza del 98.5% de la superficie de la parcela.

• **Control de manchas de maleza**

Cuando se utilizan herbicidas para el control de las malas hierbas hay una tendencia a realizar la aplicación solo en las zonas en las que estas se desarrollan. Esto permite minimizar las cantidades de producto, aplicán-

dolo solo en las zonas en la que es alto el nivel de infección. Hay tres tipos de sistemas para realizar estas aplicaciones: por mancha, por célula y mediante micro pulverización, que se diferencian por su resolución y su precisión.

Una configuración típica del sistema para aplicaciones localizadas es la de un pulverizador de barras con cámaras integradas, junto con otra para la visión general, un sistema para el procesamiento de imágenes, y un micro-proce-

FIGURA 8.- ROBOCROP INROW DE GARFORD



sador para controlar los grupos de boquillas (Figura 9). El sistema debe tener capacidad para localizar la maleza tanto si están situadas en la interfila como por debajo de las plantas cultivadas (figura 10). Por el momento no puede lograrse la precisión deseada dada la complejidad de cálculo para las velocidades normales de trabajo que se utilizan con los pulverizadores convencionales. Para conseguir los adecuados niveles de precisión hay que trabajar a baja velocidad, por lo que estos sistemas solo pueden utilizarse en los pulverizadores robotizados, y a ellos dedican su esfuerzo diferentes grupos de investigadores.

• **Ventajas derivadas de la utilización de estos sistemas**

Los sistemas de visión en dos dimensiones se adaptan a la demanda de los cultivos en líneas. Los modelos en dos di-

mensiones hacen posible definir las líneas de cultivo, la posición de las plantas y la de las malezas con una precisión de pocos centímetros.

A pesar de las variaciones en el cultivo, las diferencias en la iluminación y las condiciones de la maleza los sistemas mantienen su precisión en el tiempo. La información detallada con respecto a la posición real de las plantas hace posible mejorar la eficacia de funcionamiento en el campo de los cultivadores en líneas. Los brazos del cultivador y azadas pueden trabajar más cerca a las plantas, lo que aumenta su eficacia en el control de la maleza.

El operador solo necesita manejar el tractor dentro de las filas, con lo que los conductores con menos experiencia pueden operar el sistema. La velocidad de trabajo puede aumentar y el conductor reduce la fatiga. El sis-

tema trabaja sin que exista ningún contacto físico con las plantas o con el suelo. La información detallada sobre la posición de cada planta y la situación de la maleza facilita las operaciones del cultivo en líneas, tanto las de escarda mecánica, como las de aplicación localizada de herbicidas. A medida que aumenta la precisión de los sensores y la capacidad de procesamiento del sistema, podrá conseguirse un grado superior de automatización.

**Autoguiado de tractores y máquinas autopropulsadas**

Los trabajos agrícolas son repetitivos, a la vez que estacionales y muy dependientes de las condiciones atmosféricas. A lo largo de toda la jornada de trabajo el conductor es responsable del manejo preciso y seguro del equipo, manteniendo la calidad de la labor. Automatizando la conducción en las operaciones de campo el nivel de tensión del operador se reduce considerablemente; a la vez hace posible mantener una elevada precisión en la conducción durante periodos largos con unos niveles de fatiga reducidos.

Dentro de los sistemas de guiado automático, el uso de tecnología de visión artificial complementa el uso de sistemas de

FIGURA 9.- PULVERIZADOR PARA LA APLICACIÓN SELECTIVA DE HERBICIDA

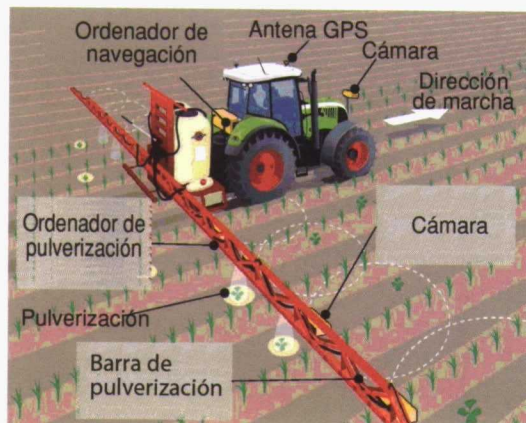


FIGURA 10.- MARCADO DE MALEZAS JUNTO AL CULTIVO



GNSS. El GNSS proporciona la posición real de la antena en un marco global de referencia dentro de la parcela. Esta información es suficiente para muchas de las operaciones como la preparación del suelo, la siembra o la siega del forraje.

Otras operaciones de campo requieren información sobre el estado del cultivo sobre el que trabaja la máquina, por lo que se necesitaría una visión tridimensional del mismo. El concepto de la visión en tres dimensiones se pueda aplicar a operaciones como el guiado automático de tractores en una plantación de viña con marco estrecho, para seguir las líneas de cultivo en caballones, o en operaciones de recolección de forraje con cosechadoras autopropulsadas.

• **La visión artificial en tres dimensiones (3D)**

La primera cámara para visión tridimensional disponible comercialmente para las aplicaciones agrícolas fue la ECO DAN. Esta dispone de dos sensores CMOS de color, dos lentes, con una resolución de 750 x 480 píxeles, y un sistema de procesado de imagen con dos elementos DSP (figura 11). Incluye algoritmos que le permiten detectar líneas de cultivo, marcado de rodadas y cordones de rastreo. La velocidad de trabajo le permite procesar entre 10 y 15 imágenes por segundo, según el tipo de aplicación, y como interface se utilizan USB y CAN-BUS.

La ventaja de la visión tridimensional es su capacidad para medir distancias. Al capturar dos imágenes simultáneamente desde puntos distintos permite establecer la posición de un objeto con respecto a la superficie del suelo. Después de su calibración quedan determinadas las coordenadas correspondientes.

En la Figura 12 se presenta las diferentes etapas del tratamiento de la imagen de un cor-

dón de paja a partir de la imagen capturada por las cámaras, para poder marcar la línea del cordón que seguirá el tractor que acciona la empacadora como referencia de autoguiado

Un ejemplo de aplicación de este sistema es el Climens VineScout, que permite el autoguiado de tractores estrechos

FIGURA 11.- CÁMARA ECO-DAN DE DOBLE LENTE



FIGURA 12.- GUIADO MEDIANTE VISIÓN TRIDIMENSIONAL

		<p>(a) Imagen de obtenida por la cámara 3D</p>
		<p>(b) Imagen procesada para detectar la altura sobre el suelo. (c) Transformación mediante pixelado de la imagen. (d) Marcado de la línea de autoguiado</p>

FIGURA 13.- CLIMENS VINESCOUT



entre las líneas de viña con independencia del nivel de vegetación. Se obtiene una precisión en el guiado de  $\pm 3$  cm. Y puede utilizarse tanto de día como de noche. Unas alarmas acústicas advierten al conductor de la llegada al cabecero de la parcela, de forma que tome el mando para pasar a la siguiente calle.

Otra aplicación del sistema es la denominada Claas CAMPi- lot que permite el guiado de tractores y cosechadoras de forraje siguiendo líneas, marcas de campo o cordones de paja. Puede guiar el vehículo automáticamente siguiendo la estructura de re-

FIGURA 14.- AUTOGUIADO MEDIANTE EL SISTEMA CLAAS CAMPILOT



FIGURA 15.- CÁMARA DE VISIÓN 3D SITUADA SOBRE EL TUBO DE DESCARGA



ferencia con una precisión de  $\pm 5$  cm a una velocidad de 10 km/h y  $\pm 10$  cm a 20 km/h.

• Claas AutoFill

En la recolección del forraje, cuando la picadora descarga sobre el remolque de forma continua, resulta difícil sincronizar la conducción de ambas máquinas para evitar que en determinados momentos parte de forraje picado caiga fuera de la caja del remolque.

Para evitar que se produzcan estas pérdidas, especialmente cuando se trabaja en parcelas con obstáculos, se ha desarrollado el Claas AutoFill, basado en un sistema de visión tridimensional, que detecta la posición de la caja del remolque, así como el grado de llenado en las diferentes zonas de la misma.

La cámara con dos sensores CMOS con resolución de 752 x 480 píxel y alta sensibilidad de color, situada sobre el tubo de descarga de la cosechadora, suministra la visión en tres dimensiones de la caja del remolque. La unidad de control (VBM) mueve la dirección de la descarga para que siempre quede sobre la caja, corrigiendo la posición a medida que la caja se llena hasta el nivel máximo. Toda la información se maneja mediante CAN-BUS hasta el procesador (ECU) que gestiona el sistema, que puede trabajar tanto de día como de noche integrado en el monitor Cebis de Claas.

Conclusiones y perspectivas

Los sistemas de GNSS permiten determinar la posición de la antena en un marco de referencia global. Utilizando antenas múltiples se mejora la determinación de la posición del apero con respecto al tractor, pero no se puede reflejar la posición real del cultivo en sus diferentes etapas, especialmente en lo que respecta a la recolección.

Con sistemas láser y con determinados captadores mecánicos se puede determinar la po-

sición relativa del cultivo, pero son sistemas poco flexibles y especializados para una tarea específica

La visión artificial, especialmente cuando se combinan los sistemas de dos y tres dimensiones, permite interpretar con detalle la escena por delante de apero o del tractor. La estructura espacial puede medirse utilizando sistemas basados en el color, la intensidad, el tamaño y la forma de los objetos. A la vez estos sistemas son de montaje flexible, para utilizarlos en máquinas diferentes o en operaciones distintas.

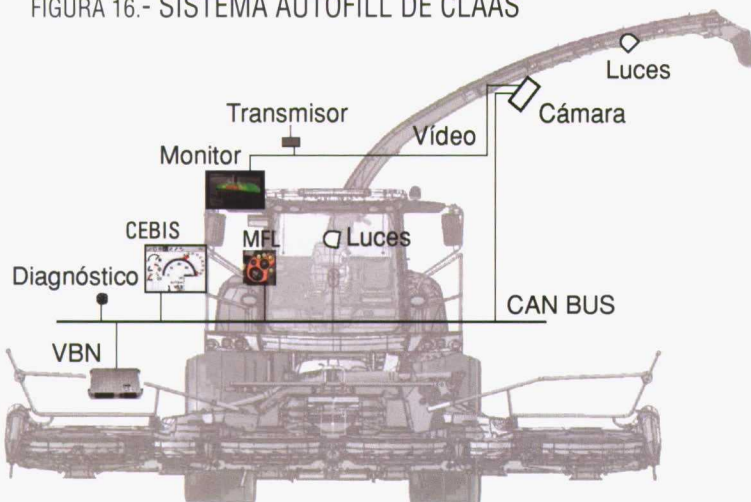
Con la tecnología de visión artificial se puede automatizar la conducción del vehículo en operaciones de recolección, y siguiendo otros tipos de marcas en la parcela, con lo que se reduce la tensión del conductor cuando tiene que realizar simultáneamente varias operaciones, a la vez que permite aumentar la velocidad de trabajo, con el consiguiente ahorro de tiempo.

La versatilidad de la tecnología de visión artificial hace previsible que avance buscando soluciones a problemas complejos que conviene automatizar. Es importante la mejora de los sensores para asegurar que la información que suministran es fiable en todas las condiciones.

La tecnología de visión artificial se combinará con otros sensores, como los de GNSS, escaneado por láser, radares, etc., para hacer posible el comportamiento autónomo de la máquina. A medida que estas tecnologías alcancen un mayor nivel de madurez, se necesita que, al incorporarlas a la maquinaria agrícola, ofrezcan robustez y aseguren un funcionamiento fiable en todas las condiciones de campo.

Una información completa de los trabajos presentados en el 21ª Reunión Plenaria del Club of Bologna se puede encontrar en [www.clubofbologna.org](http://www.clubofbologna.org).

FIGURA 16.- SISTEMA AUTOFILL DE CLAAS



VBM: Módulo de control de la orientación de la descarga.