

Desarrollo de una máquina para la inspección automática de gajos de mandarina para conserva

José Blasco y Enrique Moltó.

Centro de Agroingeniería. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Moncada, Valencia.

Este trabajo presenta una solución basada en visión artificial aplicada a la inspección automática de gajos de mandarina. El Centro de Agroingeniería del IVIA ha construido un prototipo y demostrado, mediante su puesta a punto y prueba en la industria, que la máquina es capaz de operar satisfactoriamente obteniendo un rendimiento comercial.

La importancia económica de la fruta procesada en la industria española es creciente, aunque todavía es relativamente baja en comparación con la de la fruta en fresco. Tanto en España como en otros países desarrollados, la mayor parte de la investigación y el desarrollo sobre máquinas de inspección automática de la calidad de productos agrícolas se ha enfocado hacia la fruta para consumo en fresco, como naranjas (Aleixos *et al.*, 2002; Blasco *et al.*, 2007a; Blasco *et al.*, 2007b), manzanas (Leemans y Destain, 2004), melocotones (Zwiggelaar *et al.*, 1996), tomates (Edan *et al.*, 1997), etc.

Sin embargo, la fruta procesada puede generar un mayor valor añadido y, por ello, en la literatura científica se pueden encontrar, aunque en menor cantidad, trabajos para la inspección de melocotones antes de ser envasados (Vizmanos *et al.*, 1997) o para la selección de aceitunas de mesa (Díaz *et al.*, 2000; Díaz *et al.*, 2004).

La industria del envasado y comercialización de gajos de mandarina en España puede dar salida a nuestros excedentes de producción y ofrecer un producto diferente en mercados en los que no está muy extendido su consumo en fresco, así como satisfacer la demanda de este producto en la industria alimentaria (pastelería, repostería en general) u hostelera. Sin embargo, la producción de gajos en conserva en Europa ha sufrido un dramático retroceso en los últimos años, debido a los bajos costes de producción de terceros países, como China, cuyo precio de venta es inferior a nuestros costes de producción.

En la actualidad, en la industria del gajo de mandarina, todos los procesos productivos tienen un alto grado de automatización, excepto el de la inspección final de la calidad individual de cada gajo. Cuando las mandarinas entran en la cadena de producción, se pelan y se se-

paran los gajos con máquinas que trabajan con agua a presión. Luego se termina la separación de los gajos y el pelado de los mismos mediante un proceso enzimático. Por último, los gajos se clasifican por tamaños, se seleccionan por calidades y se envasan. La inspección del producto y separación en categorías se realiza manualmente (Blasco *et al.*, 2007c), con el objetivo de retirar los gajos que poseen semillas o aquellos que están rotos o no presentan una calidad suficiente. Este proceso no está todavía automatizado por la particular dificultad del manejo del gajo, que es un producto frágil y difícil de separar, lo que hace necesario el desarrollo de tecnología específica y muy diferente de la empleada para inspeccionar la fruta en fresco, de mayor tamaño y resistencia.

Una máquina para la inspección automática de gajos debe diferenciar los gajos enteros, sanos y sin semillas de los parcialmente rotos, los "dobles" (grupos de dos o más gajos que no se han separado en las fases anteriores), los que presentan defectos de pelado (membranas o piel adheridas), o de aquellos que contienen semillas. Cuando se detecta un gajo defectuoso, un trozo de piel o cualquier otro material extraño ajeno al producto, debe eliminarse de la cadena de producción para evitar que llegue al consumidor. Cuando la inspección se realiza por operarios aparecen problemas relacionados con la subjetividad, el cansancio o la disparidad de criterios entre el personal a la hora de decidir, por ejemplo, hasta qué punto está un gajo roto. Ello redundaría en la disminución de la calidad de la inspección y, por consiguiente, del producto final. Los avances en el desarrollo de sistemas de visión por computador en tiempo real permiten la posibilidad de construir una máquina automática que aumente la calidad de la inspección y reduzca los costes de producción.

La industria del envasado de gajos de mandarina en España puede dar salida a nuestros excedentes de producción. Sin embargo, la producción de gajos en conserva en Europa ha sufrido un dramático retroceso debido a los bajos costes de producción de terceros países. En esta industria, todos los procesos productivos tienen un alto grado de automatización, excepto en la inspección final de la calidad de cada gajo.

Los sistemas de visión artificial permiten analizar parámetros externos de un objeto, como su tamaño, forma o color. El análisis simultáneo de varios parámetros morfológicos puede determinar la forma de objetos irregulares o distinguir entre objetos con formas y áreas diferentes.

Además de un procedimiento de análisis de imagen eficiente, para construir una máquina de inspección automática se necesitan dispositivos mecánicos que individualicen, transporten y separen los gajos en función de la calidad individual estimada por el sistema.

En este contexto, el Centro de Agroingeniería del IVIA, a través del proyecto TRT2006-00046-00-00 Desarrollo de prototipos de visión artificial para la inspección y clasificación automática de fruta procesada mediante visión artificial, financiado por el INIA, está trabajando en el desarrollo de un prototipo de inspección, clasificación y separación de gajos de mandarina para conserva, basado en visión artificial. El prototipo consta de elementos para la individualización y alineación de la fruta, para la inspección de las piezas en tiempo real y para la manipulación y separación los gajos en categorías.

Objetivos

El objetivo de este trabajo es presentar una solución de ingeniería para la clasificación automática de gajos de mandarina mediante visión artificial y su separación en categorías comerciales. El sistema de inspección debe identificar los gajos enteros y distinguirlos de los rotos, dobles y con semillas, estableciendo grados de rotura que se corresponden con distintas categorías comerciales (los gajos partidos aproximadamente por la mitad son de una categoría comercial diferente a los gajos con menor rotura). Además, también debe detectar cuando varios gajos viajan en contacto para evitar errores en la determinación de la calidad individual de cada gajo. Es muy importante que los gajos se transporten y se presenten al sistema de visión aislados, sin contacto de unos con otros, debido a que esto dificulta su separación y podría confundir al sistema de inspección, todo ello mientras la fruta viaja sobre una cinta transportadora. Una dificultad añadida es el hecho de que hay un número aleatorio de gajos en cada imagen, sin una posición predeterminada. Los gajos circulan mojados, lo que provoca brillos y reflejos que pueden ocultar defectos o distorsionar la percepción del color de la fruta.

El diseño de la máquina incluye, por tanto, la construcción de mecanismos para individualizar y transportar los gajos, el desarrollo de algoritmos de visión de ordenador en tiempo real para la inspección y clasificación del producto, la concepción de algoritmos y dispositivos para sincronizar la unidad de inspección con el sistema de clasificación, el diseño de un sistema para separar los gajos en categorías y de procedimientos de control para supervisar la máquina, incluyendo un interfaz amigable con el usuario.

La producción mínima requerida es de una tonelada por hora, equivalente a inspeccionar aproximadamente 56 gajos por segundo.

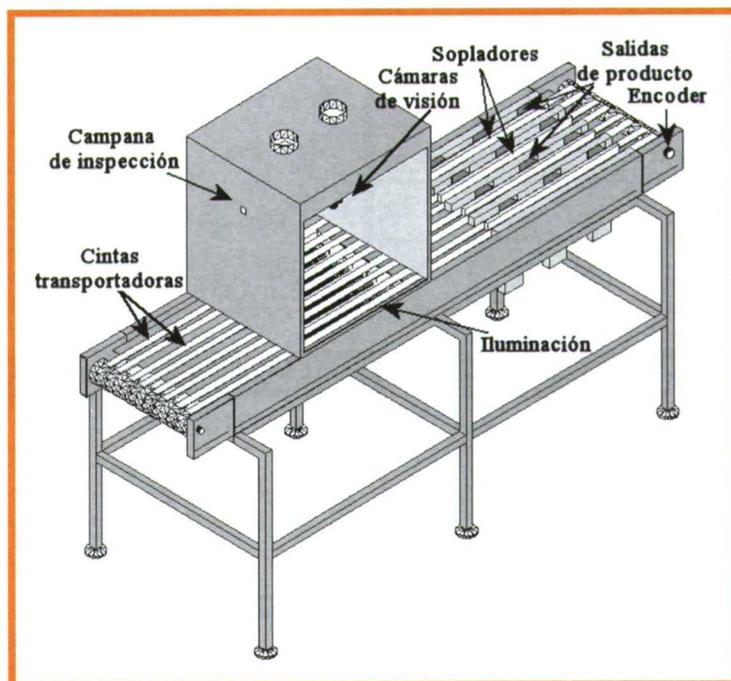
Descripción de la máquina

La **figura 1** muestra una vista general de la máquina, en la que se aprecian sus partes principales: admisión del producto, transporte del mismo, cámaras de visión y salidas de los gajos clasificados.

Los gajos llegan del sistema de pelado enzimático y entran en una plataforma inclinada, con un movimiento de vibración que los separa y esparce a lo ancho de los 600 mm que ocupa transversalmente la máquina de inspección. Unas cuñas obligan a los gajos a caer sobre seis cintas transportadoras, de 50 mm de anchura cada una. Estas cintas transportadoras se desplazan a una velocidad relativamente alta (alre-

Figura 1.

Vista general de la máquina en la que se aprecian sus diferentes partes: admisión de gajos, inspección y salidas del producto clasificado.



dedor 800 mm/s) respecto al movimiento de los gajos sobre la plataforma, lo que induce a que éstos se separen a medida que caen en ellas.

Las cintas transportan los gajos hacia el sistema de inspección, que consta de dos cámaras de color con muestreo progresivo, reset asíncrono, disparo externo y salida de vídeo RGB. El tamaño de las imágenes es de 512 x 384 píxeles y su resolución de 0,24 mm/píxel. La escena se ilumina mediante tubos fluorescentes, alimentados por reactancias electrónicas de alta frecuencia para evitar el efecto de parpadeo de las imágenes. Los tubos se sitúan a ambos lados y debajo de cada cinta transportadora (retroiluminación), para aumentar el contraste entre las semillas y el resto de los gajos. Se emplean filtros polarizadores para reducir los brillos ocasionados por los gajos mojados. Las cámaras están conectadas a un ordenador personal a través de una tarjeta de adquisición de imágenes.

Procesamiento de las imágenes

Tras la adquisición de las imágenes, el primer paso es la segmentación. Consiste en determinar aquellas regiones de la imagen que corresponden a los gajos y separarlos de aquellas que corresponden al fondo. La retroiluminación permite obtener imágenes en las que los gajos están muy contrastados respecto del fondo, preservando parte de su color. Los gajos aparecen en las imágenes como objetos translúcidos de color naranja, mientras que las semillas aparecen como objetos oscuros en el interior de los mismos. Los restos de piel y otros objetos extraños aparecen como objetos opacos en su mayor parte. En la **figura 2** se aprecia una imagen original con gajos de distintas calidades y restos de pieles, junto con la misma imagen tras la segmentación realizada por el sistema. El **cuadro 1** muestra los distintos valores de los colores (en coordenadas RVA – rojo, verde, azul) de los gajos, el fondo de la imagen y el material extraño. Debido a los tubos fluorescentes colocados debajo de las cintas transportadoras, los valores correspondientes al fondo están completamente saturados, mientras que los ga-

Figura 2.

Imagen con la que trabaja el sistema de visión.

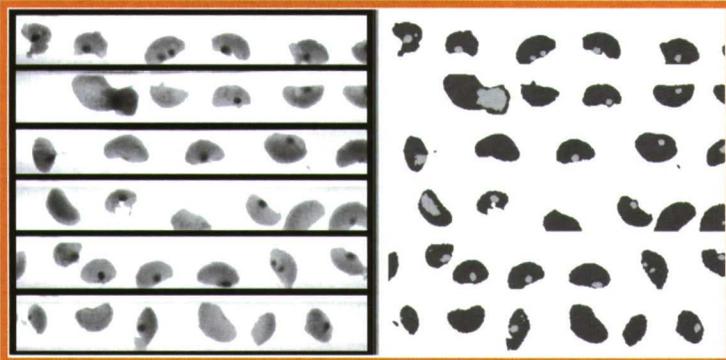
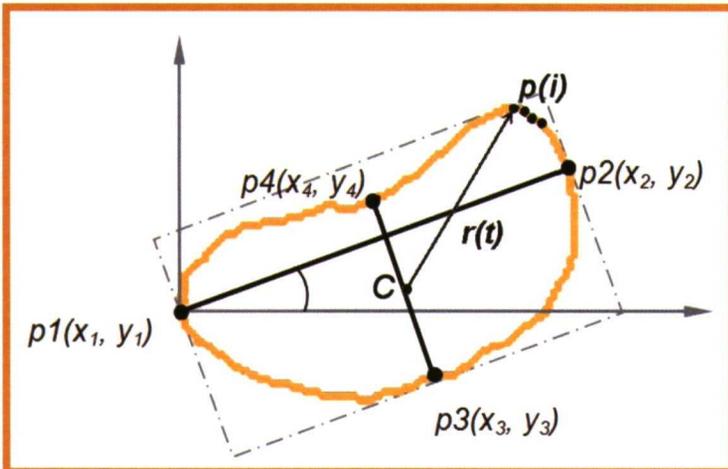


Figura 3.

Representación de la simetría de un gajo entero.



jos presentan valores más elevados que el material extraño, particularmente en el canal de color rojo, lo que permite establecer umbrales en este color para separar entre estas tres clases de objetos.

A partir de los datos que se presentan en el **cuadro I** se realiza una doble segmentación. Primero se elimina el fondo y después se distingue entre los distintos tipos de objetos. Como se aprecia en el cuadro, los objetos tienen poca componente azul en comparación con el fondo, por lo que se emplea un umbral azul para realizar esta separación. Todos los píxeles de la imagen cuyo valor de azul es inferior a 150, se consideran que pertenecen a objetos de interés, en caso contrario, se consideran píxeles de fondo.

En un segundo paso se emplea el canal rojo para separar los gajos de los objetos extraños, debido a que la diferencia entre ambas clases es máxima en este canal. Incluso los gajos dobles se pueden distinguir mediante un umbral en la banda roja de la imagen. Tanto el material extraño como los gajos que contienen semillas pertenecen a la misma categoría comercial y deben ser rechazados y eliminados de la cadena comercial. Cada vez que el sistema detecta un objeto de estas categorías lo rechaza y no continúa con su análisis. El resto de objetos que superan este corte son considerados gajos y se analizan para determinar si están enteros o rotos, y, en su caso, determinar su grado de rotura.

Una vez segmentada la imagen, se analizan los

objetos de interés calculando su perímetro, que está formado por aquellos píxeles que pertenecen al objeto, pero que tienen algún vecino perteneciente al fondo. El centroide del objeto se calcula como el promedio de las coordenadas X e Y de los píxeles del perímetro. El área se calcula como el número de píxeles dentro del perímetro. Los momentos de inercia se calculan para obtener los ejes principales de inercia que se usan y a su vez, para estimar la orientación y la longitud y anchura del objeto.

Posteriormente se calculan parámetros derivados, como la elongación del objeto, que es la razón entre su longitud y su anchura; el factor de forma, que es una estimación de su circularidad, o la compacidad, que permite analizar la presencia de concavidades y convexidades en el contorno causadas por roturas en el gajo.

Un gajo intacto es bastante simétrico respecto a un eje transversal (segundo eje principal de inercia), mientras que si está roto, esta simetría se rompe. La distribución de la masa del gajo a ambos lados de dicho eje puede usarse como una estimación de la simetría. Si proyectamos una parte del gajo sobre la otra, el número de píxeles coincidentes nos dará una idea de lo simétrico que es el gajo. La **figura 3** representa la simetría de un gajo entero. La **figura 4** muestra en su izquierda un gajo entero donde la parte derecha se ha proyectado sobre la izquierda. En gris se muestran los píxeles coincidentes. En esta misma figura, en su parte derecha, se observa la misma proyección de un gajo roto. Se aprecia que el número de píxeles coincidentes es menor.

Por último, se codifica el contorno empleando la denominada firma polar. Esta firma se obtiene midiendo una secuencia de las distancias euclídeas entre el centroide del objeto y cada uno de los puntos del perímetro. La **figura 4** muestra gráficamente esta firma. En la parte izquierda se ve el contorno de un gajo típico mostrando la distancia entre el centroide y el primer punto del perímetro. A la derecha se observa el gráfico de la firma. Se calcula la transformada rápida de Fourier (FFT) de esta firma, ya que proporciona una información que puede emplearse para determinar la forma del gajo (Tao et al., 1995).

Antes de comenzar el trabajo en línea, un operario realiza el aprendizaje del sistema. Para ello, se utiliza el sistema de visión para calcular todos los parámetros de color, tamaño y forma y de los objetos de una muestra de objetos representativa de la producción, que contiene gajos enteros, rotos, dobles, etc., y, a partir de estos datos se genera automáticamente un modelo estadístico que permite, durante el trabajo en línea, decidir la clase de cada objeto (gajo entero, roto, medio

Cuadro I.

Estadísticas básicas del color del material inspeccionado por el sistema. R, nivel de gris en la banda roja; V, en la verde y A en la azul.

	Gajos			Material no deseado			Fondo de la imagen		
	R	V	A	R	V	A	R	V	A
Promedio	204,2	97,2	43,6	78,0	48,7	45,4	255,0	250,5	255,0
Desviación típica	36,6	20,0	11,3	18,8	9,8	14,6	0,0	4,3	0,0

Cuadro II.

Grado de coincidencia entre la clasificación de la máquina y la clasificación de los expertos.

Clasificación automática	Clasificación de expertos					
	Enteros	Rotos	Mitades	Con semillas	Material no deseado	Gajos Dobles
Enteros	91,2%	7,8%	0,3%	0,7%	0,0%	0,0%
Rotos	12,9%	80,4%	6,7%	0,0%	0,0%	0,0%
Mitades	1,1%	5,7%	93,2%	0,0%	0,0%	0,0%
Con semillas	4,7%	0,9%	0,3%	94,1%	0,0%	0,0%
Material no deseado	1,9%	2,7%	1,2%	0,0%	94,2%	0,0%
Dobles	11,9%	3,4%	0,1%	0,0%	4,2%	80,4%

VALIANT 500 RS REVERSIBLE



324,98 € al mes el primer año.

Operación a 6 años con amortización mensual.

12 primeras cuotas de 324,98 €, 60 cuotas restantes de 387,45 €.

Coste total a plazos 27.146,76 €. Sin comisiones de estudio ni de apertura.

PVP del tractor sin financiar 23.397 € IVA incluido.

T.A.E.: 5,01%.

T.I.N. 12 primeros meses: 0%

T.I.N. 60 meses restantes: 7,15%



Motor Diesel LOMBARDINI de 48 CV, refrigerado por agua.

Cambio de 24 velocidades: 12 adelante y 12 atrás, con inversor sincronizado.

TRACTORES EXCELENTES FINANCIACIÓN EXTRAORDINARIA

A la hora de financiar tu tractor, tú decides. Elige el tractor que más te guste dentro de la amplia gama BCS y nosotros te ayudamos a adquirirlo proponiéndote la fórmula de financiación que mejor se adapte a tus necesidades.

Podrás financiar la totalidad del valor de tu tractor, IVA incluido, con la posibilidad de ajustar la duración del crédito hasta un plazo de 6 años, escogiendo la forma de pago en cuotas mensuales, trimestrales, semestrales o anuales.

Además, para todos los tractores BCS financiados a 12 meses te ofrecemos: **Interés 0% y T.A.E. 0%*** para otros plazos consultar en BBVA o en su concesionario BCS.

VIVID 300 DT (26 CV)

177,00 € al mes el primer año.

60 cuotas restantes de 211,00 €.

T.A.E.: 5,01%

- Operación a 6 años con amortización mensual.
- Coste total a plazos 14.785,2 €.
- Sin comisiones de estudio ni de apertura.
- PVP promocional del tractor sin financiar 12.743 € IVA incluido.
- T.I.N. 12 primeros meses: 0%
- T.I.N. 60 meses restantes: 7,15%



VICTOR 300 AR (26 CV)

154,86 € al mes el primer año.

60 cuotas restantes de 184,63 €.

T.A.E.: 5,01%

- Operación a 6 años con amortización mensual.
- Coste total a plazos 12.936,12 €.
- Sin comisiones de estudio ni de apertura.
- PVP promocional del tractor sin financiar 11.149 € IVA incluido.
- T.I.N. 12 primeros meses: 0%
- T.I.N. 60 meses restantes: 7,15%



Calcula la cuota de tu tractor en: www.bcsiberica.es | RED DE CONCESIONARIOS OFICIALES BCS

Promoción válida desde el 1 de Septiembre de 2008 hasta el 31 de Enero de 2009.

Financiado por

BBVA

*Financiación ofrecida por el BBVA para los tractores BCS en operaciones a 12 meses, con intereses y comisiones de apertura y estudio subvencionados por BCS IBÉRICA, S.A.U.

Figura 4.

Representación de la simetría de un gajo roto.

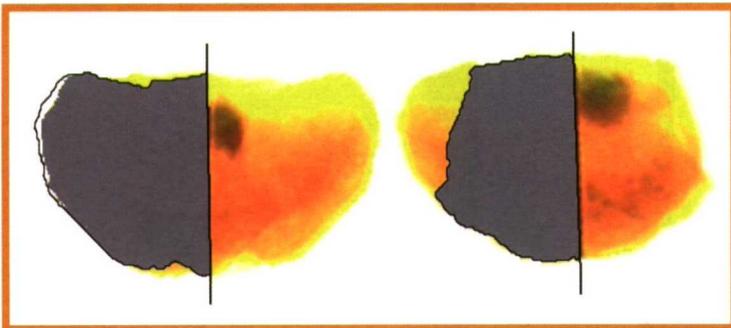
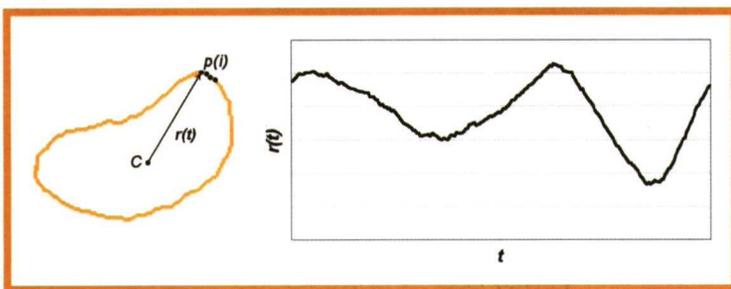


Figura 5.

Representación gráfica de la firma polar del contorno de un gajo.



gajo, gajo con semilla o gajos dobles) que se presenta ante el sistema de inspección.

Durante el trabajo en línea, una vez calculada la clase de cada objeto y su posición en la imagen, ambos datos se envían al sistema de separación que, en el caso de que el objeto sea un elemento indeseable, determina en qué momento debe activarse la electroválvula correspondiente para sacarlo de la línea por el canal adecuado. Si el objeto detectado es un gajo entero, se le deja continuar hacia la zona de envasado. La sincronización del sistema de inspección y del sistema de expulsión se realiza mediante la lectura de los pulsos generados por un codificador óptico (encoder) conectado al eje de arrastre de las cintas transportadoras.

Ensayos realizados

Para estimar el rendimiento de la máquina, el prototipo se ensayó en las instalaciones de una empresa productora, adquiriendo y procesando más de 15.000 imágenes. Los gajos clasificados automáticamente se evaluaron posteriormente por expertos de la propia compañía. Para medir la velocidad del proceso de análisis de las imágenes se empleó un osciloscopio. Al comienzo del proceso una señal enviada al osciloscopio comenzaba la cuenta del reloj que se detenía al enviar una segunda señal tras finalizar el análisis. El tiempo transcurrido entre ambas señales es el tiempo requerido para analizar una imagen.

Resultados

El sistema de individualización funcionó correctamente durante los ensayos en la industria. Para ello fue necesario ajustar la inclinación del plano y la frecuencia de vibración adecuadamente para optimizar la separación y distribución entre las seis cintas transportadoras.

El resultado de la clasificación automática sobre 15.000 imágenes, en comparación con la realizada por los expertos se muestra en el **cuadro II**. El prototipo clasificó correctamente el 91% de los gajos enteros. Respecto a los gajos defectuosos, se clasificaron correctamen-

te el 80% cuando la rotura era de poca importancia y el 93% de los gajos partidos aproximadamente por la mitad. Por otra parte, los gajos con semillas y el material de desecho se detectó y eliminó en un 94% de los casos.

El resultado obtenido en la clasificación de los gajos rotos se explica por la dificultad que tiene el sistema para identificar aquellos que están ligeramente rotos por uno de sus extremos, conservando valores de los parámetros como la longitud o, incluso, la simetría, similares a los de los gajos enteros. Por otra parte, aunque menos importante desde el punto de vista comercial, se aprecia que los gajos con roturas mayores se confundieron con gajos partidos por la mitad, que pertenecen a otra categoría comercial. El promedio de acierto total fue del 89%.

El tiempo empleado por el proceso de análisis de las imágenes es de 48 ms, lo que permite analizar hasta 22 imágenes por segundo. Sin embargo, en el prototipo se ha limitado a un máximo de 12 imágenes por segundo, para no forzar la mecánica de la máquina y por la fragilidad de los gajos inspeccionados, que requieren un manejo cuidadoso. Este hecho abre la posibilidad de implementar en el futuro algoritmos de visión más sofisticados como, por ejemplo, sistemas de auto-aprendizaje que sean capaces de adaptar los parámetros de decisión y clasificación a las posibles variaciones del color del producto.

El sistema de separación se ha mostrado eficaz para separar los objetos independientemente de la velocidad de las cintas debido al sistema de sincronización mediante el codificador óptico conectado al rodillo de las cintas. ■

Agradecimientos

Los trabajos de investigación descritos en este artículo han sido financiados parcialmente por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) a través del proyecto TRT2006-00046-00-00, con la colaboración de la empresa Agriconsa, S.A.

Bibliografía

- Aleixos N., Blasco J., Navarrón F., Moltó E. (2002). Multispectral inspection of citrus in real-time using machine vision and digital signal processors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 33(2), 121-137.
- Blasco J, Cubero S, Arias R, Gómez J, Juste F, Moltó E (2007c). Development of a computer vision system for the automatic quality grading of mandarin segments. *Lecture Notes in Computer Science* 4478, pp 460-466.
- Blasco J., Aleixos N., Gómez J., Moltó E. (2007b). Citrus sorting by identification of the most common defects using multispectral computer vision. *Journal of Food Engineering*, 83(3), 384-393.
- Blasco J., Aleixos N., Moltó E. (2007a). Computer vision detection of peel defects in citrus by means of a region oriented segmentation algorithm. *Journal of Food Engineering*, 81(3), 535-543.
- Díaz R., Faus G., Blasco M., Blasco J., Moltó E. (2000). The application of a fast algorithm for the classification of olives by machine vision. *Food Research International*, 33, 305-309.
- Díaz R., Gil L., Serrano C., Blasco M., Moltó E., Blasco J. (2004). Comparison of three algorithms in the classification of table olives by means of computer vision. *Journal of Food Engineering*, 61, 101-107.
- Edan Y., Pasternak H., Shmulevich I., Rachmani D., Guedalia D., Grinberg S., Fallik E. (1997). Color and Firmness Classification of Fresh Market Tomatoes. *Journal of Food Science*, 62(4), 793-796.
- Leemans V., Destain M.F. (2004). A real-time grading method of apples based on features extracted from defects. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 83-89.
- Tao Y., Morrow C.T., Heinemann P.H., Sommer H.J. (1995) Fourier-Based Separation Technique for Shape Grading of Potatoes Using Machine Vision. *Transactions of the ASAE*, 38(3) 949-957.
- Vizmanos J.G., Fuentes L.M., Gutierrez J.A. (1997). Splinter detection in half-cut peaches. In *Proceedings of the SPIE*, 3208 (pp. 277-286).
- Zwiggelaar R., Yang Q., García-Pardo E., Bull C.R.R. (1996). Use of Spectral Information and Machine Vision for Bruise Detection on Peaches and Apricots. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63(4), 323-331.