

(S9-O61)

EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE LA CALIDAD DE PRODUCTOS HORTOFRUTÍCOLAS EN LÍNEAS DE CONFECCIÓN

ABELARDO GUTIERREZ, JOSE BLASCO, FLORENTINO JUSTE y ENRIQUE MOLTÓ

Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, Ctra. Moncada-Náquera km 5, 46113
Moncada (Valencia), España, gutierre@ivia.es, Tel: 963424000, Fax: 963424001

Palabras clave: calidad de fruta - sensor de firmeza – tratamiento de imágenes – repetibilidad – inspección automática

RESUMEN

En el sector hortofrutícola, la exigencia de calidad por parte del consumidor es cada vez mayor. Actualmente, hay una creciente demanda dirigida a una adecuada automatización de los procesos industriales que permitan garantizar una calidad excelente del producto final.

El Centro de AgroIngeniería del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), en colaboración con el sector industrial, ha desarrollado durante los últimos años sensores electrónicos y sistemas de inspección por visión artificial que permiten una clasificación automática de distintos productos hortofrutícolas muy significativos para la agricultura española, entre los que cabe citar:

- Un sensor de firmeza capaz de clasificar melocotones en tres categorías: muy firmes, firmes y poco firmes. Los ensayos realizados en una línea de confección precomercial demuestran que el sensor puede trabajar adecuadamente a 8 frutas s⁻¹ y es capaz de clasificar la firmeza con un 80% de repetibilidad.

- Un prototipo capaz de inspeccionar automáticamente granos de granada para el consumo por visión artificial. La máquina individualiza, inspecciona, clasifica y separa los granos de granada en cuatro de categorías de calidad que son función de su color y tamaño, rechazando aquellos que no cumplen las especificaciones mínimas y agrupando los que presentan características similares. Con ello se consigue el envasado en lotes de producto uniforme y de alta calidad, resultando más atractivo al consumidor.

- Un sistema para clasificar automáticamente gajos de mandarina para conserva por visión artificial. El sistema distingue entre gajos enteros, rotos o dobles, además de detectar la presencia de semillas en los gajos. El sistema clasifica correctamente más del 75% de los gajos analizados.

NON-DESTRUCTIVE QUALITY ASSESSMENT OF HORTICULTURAL PRODUCTS IN SORTING LINES

Keywords: fruit quality - firmness sensor – machine vision – repetibility – automatic inspection

ABSTRACT

In the fruit and vegetable sector, the quality of the produce has become an important demand for consumers that makes necessary the automation the industrial processes that allow to guarantee an excellent quality of the final product

During the last ten years, The Centre for Agroengineering research of the Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), in collaboration with industrial sector, has developed electronic sensors and computer vision systems for the automatic on-line inspection and classification of several horticultural products of great interest for Mediterranean agriculture. Among the recent researches it is necessary to mention:

- A firmness sensor capable of classifying peaches under three categories: very firm, firm and slightly firm. A module composed by two sensors has been integrated in a pre-commercial sorting line working at 8 fruits s^{-1} . The performed tests have demonstrated its reliability with up to 80% of success rate.

- A prototype capable of inspecting automatically pomegranate arils for the consumption by means of artificial vision. The machine individualizes, inspects, classifies and separates the arils in four of categories of quality that are a function of the colour and size, rejecting those that do not fulfil the minimal specifications and grouping those who present similar characteristics.

- A system to classify automatically segments of mandarin for conserve by means of artificial vision. The system distinguishes among sound, broken or double segments, and is able to detect the presence of seeds in the segments. The system classifies correctly more than 75 % of the analyzed segments.

INTRODUCCIÓN

El sector industrial ligado al procesamiento y comercialización de productos hortofrutícolas está experimentado, sobre todo durante los últimos cinco años, un profundo proceso de reestructuración motivado por muy diversos factores.

Por un lado, es evidente que la exigencia de calidad por parte del consumidor es cada vez mayor. De esta forma, tanto el sector minorista como los grandes almacenes de alimentación exigen requisitos cada vez más estrictos sobre la calidad de la fruta suministrada por los proveedores. Al principio los requisitos de calidad se limitaban al aspecto visual de la fruta, pero actualmente se han extendido a otros parámetros, de los que cabe destacar el estado de madurez. La estimación de la madurez supone medir parámetros tales como la firmeza y el contenido en azúcar.

Por otro lado, la irrupción en el mercado hortofrutícola de países emergentes ha supuesto una dura competencia sobre productos de alto valor estratégico para España como es el caso de los cítricos. Tal ha sido el impacto que las exportaciones españolas de gajos de mandarina (variedades Satsuma y Clementina, básicamente) se han reducido drásticamente durante los últimos diez años (MAPA, 2002). Este problema puede extenderse con facilidad a otros productos como ya está ocurriendo por ejemplo con el espárrago.

La solución a ambos problemas requiere una adecuada automatización de los procesos industriales, siempre y cuando no supongan una merma de calidad del género, así como la introducción de nuevos sensores electrónicos que proporcionen información sobre parámetros de calidad del producto. Generalmente, las industrias de procesado de fruta disponen de máquinas que automatizan la mayor parte de los procesos que sufre la fruta antes de ser clasificada. Sin embargo, apenas se ha avanzado en la automatización de la inspección y la clasificación del producto.

Otro aspecto a tener en cuenta es la posibilidad de aprovechar el gran avance tecnológico producido durante estos últimos diez años así como su abaratamiento para comercializar nuevos productos alimentarios de alto valor añadido que requieren un procesamiento complejo imposible de abordar anteriormente. Un caso claro es el de la granada. Es un producto altamente estacional con una producción elevada a la que hay que dar salida en un periodo de tiempo relativamente corto. En el campo se ve afectada por el

llamado golpe de sol, que no afectan a su calidad organoléptica, pero que dificultan o impiden su comercialización en fresco debido a que degradan su apariencia. Por otra parte, está la dificultad de su pelado, que produce en el consumidor un rechazo a favor de otras frutas más fáciles de preparar. Una solución es la comercialización de los granos de las granadas envasados y listos para el consumo. Además, se daría salida a las aproximadamente 300 toneladas anuales de granadas afectadas por daños en su piel, pero que conservan toda su calidad y todas las propiedades nutritivas y organolépticas de los granos. En la actualidad estas granadas no se comercializan.

El Centro de AgroIngeniería del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (I.V.I.A.), en colaboración con empresas del sector, ha propuesto durante los últimos diez años soluciones tecnológicas a los tres retos citados anteriormente a través del desarrollo de nuevos sensores electrónicos y máquinas de clasificación basadas en visión artificial que permiten una inspección automática de distintos productos hortofrutícolas.

Este artículo presenta los trabajos de investigación llevados a cabo por el Centro de AgroIngeniería sobre tres productos de gran interés en la agricultura mediterránea:

Melocotón

El IVIA ha desarrollado un sensor de firmeza basándose en trabajos previos que permitieron diseñar una máquina para la detección de mandarinas bufadas (Gutierrez *et al.*, 1999). El funcionamiento del sensor se basa en el estudio del impacto de la fruta sobre una célula de carga, lo que permite estimar la firmeza analizando ciertos parámetros de la curva de fuerza frente al tiempo adquirida durante el impacto.

Aunque el sensor de firmeza descrito en este artículo utiliza una electrónica muy similar al desarrollado anteriormente (Burgos *et al.*, 2002) fue necesario rediseñar todo el procedimiento de extracción de información de las curvas de impacto y seleccionar nuevos parámetros más adecuados para la estimación de la firmeza de los melocotones. El sensor de firmeza se ha integrado en una línea de confección precomercial diseñada por la empresa española Fomesa (Figuras 1 y 2). Este trabajo pretende demostrar que el sensor de firmeza desarrollado constituye un instrumento de medida robusto para la evaluación rápida de la firmeza de los melocotones y, en concreto:

- Demostrar la fiabilidad del sensor de firmeza una vez integrado en la línea de confección trabajando a la velocidad máxima (8 frutas/s).
- Estimar la repetibilidad del sensor de firmeza a la hora de clasificar una misma fruta en alguna de las tres clases de firmeza: muy firme, firme y poco firme



Figura 1. Vista general de la línea de confección



Figura 2. Sensor de firmeza

Gajos de mandarina

España es el primer productor mundial de mandarinas con una producción superior a la tonelada y media al año. La industrialización de esta fruta se realiza, principalmente, mediante las conservas de gajos de Satsuma y Clementina que se dedican principalmente a la exportación. España y China son los principales países exportadores mundiales de gajos de mandarina. La situación actual del sector español exportador de gajos de mandarina es preocupante, debido al incremento de las exportaciones chinas provocado por la reducción de precios que este país puede permitirse, como consecuencia de los bajos niveles salariales. Como consecuencia de esta situación, las exportaciones españolas de gajos de mandarina en conserva han descendido paulatinamente en los últimos años, lo que compromete seriamente el futuro de nuestras empresas.

Para paliar esta situación, El IVIA trabaja en la automatización del proceso de inspección de la calidad final del producto mediante el desarrollo de un sistema de inspección, clasificación y separación de los gajos, basado en visión artificial. La visión artificial se emplea habitualmente en los sistemas de inspección de fruta fresca (Aleixos et al., 2002; Blasco et al., 2003 y 2007). Sin embargo, en la industria de fruta procesada no se han introducido todavía debido, en parte, a la dificultad de individualizar y separar de manera automática el producto. Este tipo de sistemas de inspección tratan, por lo general, de analizar algunos parámetros externos como el tamaño, la forma o el color. El análisis simultáneo de varios parámetros morfológicos puede determinar la forma de objetos irregulares o distinguir entre objetos con formas y áreas diferentes (Torres et al., 1994; Galindo et al., 1997).

Para el desarrollo de este trabajo, las imágenes se adquirieron sobre un prototipo de inspección dotado con 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.

La producción mínima requerida es de 500 kg/h, equivalente a inspeccionar aproximadamente 28 gajos/s. Los gajos circulan mojados, lo que provoca brillos y reflejos que pueden ocultar defectos o distorsionar la percepción del color de la fruta. Otro problema es la individualización del producto. Es muy importante que los gajos se transporten aislados, sin contacto con otros, debido a que el contacto entre gajos podría confundir al sistema de inspección. El sistema debe identificar los gajos enteros y distinguirlos de los rotos y de los

que presentan semillas. Además, debe también detectar cuando varios gajos viajan en contacto para evitar errores en la determinación de la calidad individual de cada gajo.

Granos de granada

La Granada es un producto altamente estacional con una producción elevada a la que hay que dar salida en un periodo de tiempo relativamente corto. En el campo se ve afectada por problemas, como el llamado golpe de sol, que no afectan a su calidad organoléptica, pero que dificultan o impiden su comercialización en fresco debido a que degradan su apariencia. Por otra parte, está la dificultad de su pelado, que produce en el consumidor un rechazo a favor de otras frutas más fáciles de preparar. Una solución es la comercialización de los granos de las granadas envasados y listos para el consumo, lo que permitiría introducir un nuevo producto, de alto valor añadido, en un mercado en el que los consumidores tienen cada vez una mayor predisposición a adquirir este tipo de productos listos para el consumo (Blasco et al., 2006).

La problemática que presenta la manipulación de los granos de granada es peculiar y bien diferente a la de la fruta fresca debido al pequeño tamaño, a la elevada cantidad por unidad de espacio requerida para alcanzar una producción comercial y al hecho de ser difíciles de individualizar para separarlos en distintas categorías. El primer problema para la comercialización de granos reside en la operación de desgranado, que debe evitar, o reducir en lo posible, que trozos de piel o pedazos de membranas internas se suelten junto con los granos. Posteriormente, durante el transporte en el proceso de inspección, cada grano debe de estar aislado y sin contacto con otros granos para que el sistema sea capaz de identificarlo y decidir sobre su calidad individual. Por último, se deben separar los granos en función de la calidad estimada por el sistema, lo que implica que deben poder ser expulsados en distintos puntos de las líneas de transporte sin afectar a otros granos vecinos. Dificultades añadidas son la gama de posibles colores de los granos, que abarca desde el blanco hasta el rojo intenso o, incluso, el marrón que presentan los granos en mal estado, y el hecho de estar mojados, que ocasiona brillos en la superficie de los mismos (Figura 4).



Figura 4. Granos de granada por la cinta transportadora antes de la inspección

El objetivo planteado en este trabajo es doble. Por un lado, desarrollar un sistema de visión artificial que estime la calidad de los granos y detecte las pieles, membranas, los granos en mal estado y los objetos extraños en una cadena de producción y envasado de granos de granada. Por otro, desarrollar un prototipo capaz de transportar los granos aislados por debajo de las cámaras y separarlos por distintas salidas correspondientes a su calidad sin causarles daño. El prototipo debe ser capaz de asegurar una producción mínima de 100 kg de granos por hora.

MATERIALES Y MÉTODOS

Línea de confección para la estimación de la firmeza de melocotones

La línea está formada por dos calles, cada una de las cuales integra un sistema de células de carga para obtener el peso de la fruta y un sistema de visión compuesto por cámaras RGB para medir el calibre y color de la fruta mediante análisis de imagen. Además, incorpora un sensor de infrarrojos para la evaluación del contenido en azúcar, desarrollado por la empresa Pellenc S.A. y el instituto de investigación francés Cemagref.

Inicialmente, se vuelcan los cajones con la fruta sobre un singulador, que evita agolpamientos a la entrada de la línea de clasificación. Luego, la fruta cae, de forma secuencial, desde una altura de 3 cm sobre alguno de los dos sensores de que consta el módulo de firmeza, uno por cada calle de la línea, tal como se muestra en la figura 2. Una vez producido el impacto, la fruta abandona el módulo de firmeza a través de una rampa metálica y es recogida por un rodillo de espuma que lo incorpora a la línea de confección.

Fue preciso diseñar un protocolo de comunicación específico con el objeto de recopilar toda la información procedente de cada uno de los sensores del sistema para después separarla en categorías. De esta forma, el módulo de firmeza debe realizar las siguientes tareas: registrar el impacto de la fruta sobre cada una de las dos calles de la línea, evaluar su firmeza y transmitir el estado de firmeza a la unidad de control

En esta fase, el objetivo fue construir un prototipo capaz de trabajar a una velocidad de 8 frutas/s, muy próxima a las líneas de confección comerciales. Por tanto, en primer lugar, es imprescindible demostrar que el sensor de firmeza puede trabajar adecuadamente de manera intensiva.

Por otra parte, debido a la gran heterogeneidad en la forma de la fruta, incluso dentro de una misma variedad, es necesario asegurar que el sensor de firmeza siempre clasifica una determinada fruta en el mismo estado de firmeza.

Material vegetal. Se utilizaron dos variedades de melocotones (Spring Crest, Pavía) y dos variedades de nectarina (Caldesi-2000 y Early Grand) de categoría 'Extra' (calibre mayor de 56 mm sin defectos externos importantes con una tolerancia de 5% de fruta de categoría I y 0% de categoría II). La fruta se almacenaba en cámaras frigoríficas a 4°C y 85% de humedad relativa. Varias horas antes de los ensayos se sacaba la fruta de las cámaras con el fin de atemperarlas.

Metodología. Durante todos los ensayos se realizaron medidas no destructivas a través del sensor de firmeza y medidas destructivas o de referencia sobre muestras aleatorias, una vez que la fruta hubiera pasado por la línea de confección. Las medidas destructivas se realizaron con una máquina universal de ensayos (Instron 4301). Los ensayos consistían en penetrar la pulpa de los melocotones, sin piel, usando un cilindro de 8 mm de diámetro. Se tomaban dos medidas por fruta, sobre cada una de las zonas ecuatoriales de la fruta, separadas por un ángulo de aproximadamente 90°. La velocidad de penetración era de 10 mm/min. De esta forma, se obtenían la máxima fuerza de penetración para cada una de las dos zonas, expresada en N, y la máxima penetración del cilindro en cada una de las dos zonas, expresada en mm. Como se describe y justifica en (Burgos *et al.*, 2002), se tomó como referencia destructiva de la firmeza el parámetro denominado *dureza*, calculado como la razón entre la máxima fuerza y la máxima penetración obtenidas en los ensayos de Magness-Taylor. El mínimo de las dos medidas de dureza obtenidas durante los ensayos se consideraba como la referencia de firmeza de la fruta

Ensayos de fiabilidad. El objetivo de estos experimentos era estimar la fiabilidad del sensor a través de la operación continua de la línea de confección durante dos días y un máximo de dos paradas por día.

Previo a los ensayos y, para cada variedad, se calibró el sensor de firmeza a través de un conjunto de 30 melocotones que presentaban un rango de variabilidad de dureza entre 5000 N/m y 10000 N/m, esto es, contenía frutos muy firmes, firmes y poco firmes. Se realizaban medidas destructivas y no destructivas sobre cada fruta y se construía un modelo de regresión para estimar la firmeza. El modelo calculado se validaba a lo largo de los ensayos intensivos sobre la línea de confección.

Ensayos de repetibilidad. Para estimar la repetibilidad del módulo de firmeza de la línea se diseñaron una serie de ensayos consistentes en lotes de 100 melocotones. Inicialmente, la fruta era clasificada automáticamente por la línea en tres clases diferentes:

- **Muy firme:** Dureza > 9000 N/m
- **Firme:** 5000 N/m < Dureza < 9000 N/m
- **Poco firme:** Dureza < 5000 N/m

La fruta se agrupaba de esta forma en tres cajas etiquetadas convenientemente. Posteriormente, se volcaba cada caja sobre la línea de confección de forma separada y se observaba y registraba en qué clases era de nuevo clasificada la fruta.

Se realizaron tres ensayos de repetibilidad de manera aleatoria durante el ensayo de fiabilidad para cada una de las variedades estudiadas.

Sistema de inspección automática de gajos de mandarina

La material prima objeto de análisis son gajos de mandarina Satsuma provenientes de un proceso automatizado de pelado de la mandarina, desgajado, pelado del gajo y preclasificación por tamaño, al término del cual los gajos se presentan para su clasificación y envasado según su categoría comercial.

En este trabajo, se ha empleado un lote de 15 kg de piezas de fruta, recolectado por los mismos operarios que normalmente efectúan la clasificación en las líneas de la empresa colaboradora Agriconsas, S.A. Los gajos se dividieron en 3 kg de gajos enteros y 12 kg de gajos rotos. Los gajos analizados tenían un peso promedio aproximado de 5 g, por lo que el número de piezas evaluadas para la puesta a punto y ensayo ascendió aproximadamente a unas 3.000 unidades. Durante la inspección, los gajos circularon mojados por unas cintas transportadoras semitransparentes a una velocidad de 0,8 m/s.

El primer paso del análisis de imágenes consiste en una segmentación por umbralización (figura 5), tras la cual se obtiene una imagen binaria en la que se distingue el fondo de los objetos de interés. Seguidamente, se realiza un suavizado de los bordes de los objetos, basado en un filtro de mediana, que reduce a la vez el ruido de la imagen. A partir de la imagen binaria se extraen y codifican los bordes de todos los objetos presentes en la imagen. Finalmente, a través de algoritmos desarrollados por el Centro de AgroIngeniería, se calculan algunos de los parámetros morfológicos más importantes de los gajos, como son: el área, la longitud del perímetro, la longitud del gajo basada en los ejes principales de inercia, simetría, elongación, compacidad y la codificación del perímetro mediante la transformada de Fourier.

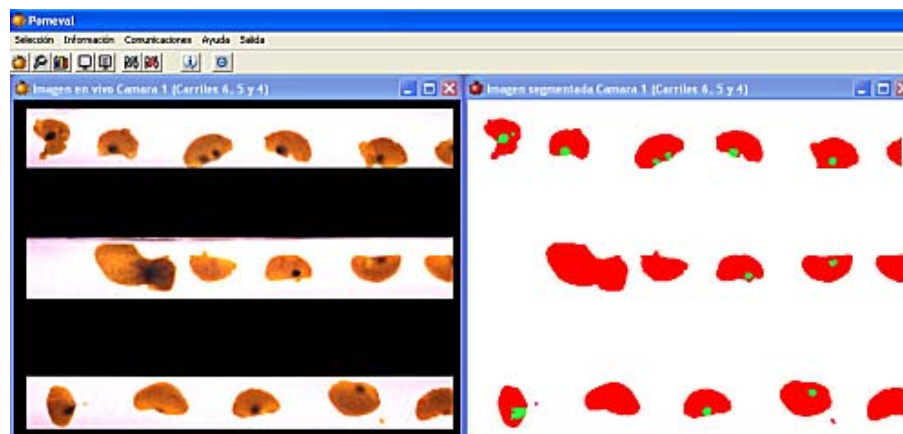


Figura 5. Imágenes original y segmentada de gajos de satsuma

Se emplearon las imágenes de 620 gajos, preclasificados por un experto, para obtener los parámetros correspondientes a cada categoría. Se utilizaron técnicas de análisis discriminante para generar un modelo que se utilizó posteriormente para clasificar otras 1.782 imágenes de gajos de categoría conocida, diferentes de los anteriores. Asimismo, se utilizó la técnica estadística del análisis discriminante para determinar la influencia individual de cada uno de los parámetros sobre la clasificación de los gajos.

Los gajos rotos se dividieron en enteros, rotos presencia de semillas y dobles. Además, junto con los gajos, se introdujeron restos de pieles de mandarina, obtenidos también en las líneas de clasificación de la empresa, que el sistema debía identificar como tales y expulsarlos junto con el destrío. Un problema adicional que se debe solucionar es el caso de gajos que viajan agrupados o en contacto, tal y como muestra la Figura 6.

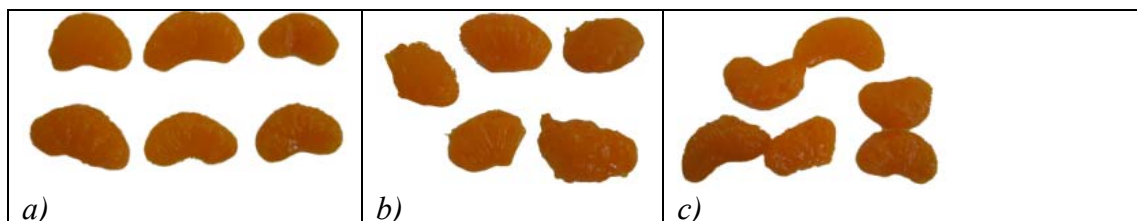


Figura 6. Gajos correspondientes a las clases a) entero, b) roto y c) agrupamiento

Prototipo para la clasificación de granos de granada

El primer paso consistió en el diseño y modelado del prototipo que debe ser capaz de individualizar, transportar, inspeccionar y clasificar los granos en cuatro categorías diferentes. El sistema de transporte consta de seis cintas transportadoras sobre las que viajan los granos a una velocidad de 1 m/s. Sobre el sistema de transporte se fabricó una campana de inspección en la que se alojan las dos cámaras de color empleadas para la adquisición de las imágenes. La resolución de las imágenes es de 0,77 mm/píxel. La escena se iluminó mediante tubos fluorescentes del tipo “luz de día” alimentados por reactancias electrónicas de alta frecuencia. Se emplearon filtros polarizadores para reducir los brillos. A continuación de la campana de inspección se emplazó el sistema de separación, que consta de unas electroválvulas situadas en un lateral de cada cinta transportadora, que expelen aire al paso de los granos.



Figura 7. Prototipo para la inspección de granos de granada

El prototipo (Figura 7) se gobierna mediante dos ordenadores personales. El primero, está dedicado a la inspección del producto y se encarga de adquirir las imágenes, analizarlas, y determinar la posición y categoría de cada objeto encontrado (membrana, grano en mal estado, grano extra, grano primera o grano segunda). El segundo ordenador, el de control del prototipo, está dedicado a la gestión de las electroválvulas así como a sincronizar la adquisición de las imágenes con el movimiento de las cintas transportadoras. Tras analizar cada imagen, este ordenador recibe la información de la posición y categoría de cada objeto, enviada por el primero mediante un protocolo de comunicaciones implementado sobre TCP/IP. A partir de ahí, sincroniza el movimiento de la cinta transportadora para expulsar los granos en el momento exacto de su paso por la salida correspondiente a la categoría estimada. Para el control de las electroválvulas, en el IVIA se diseñó y fabricó una placa electrónica que se conectó al ordenador de control del prototipo.

La mecánica, fiabilidad y precisión del prototipo se probó en el laboratorio utilizando 3.000 piezas de plástico de los colores rojo, verde, azul y negro. A cada color se le asignó una categoría diferente (Figura 8). Posteriormente el prototipo se trasladó a las instalaciones de la empresa Frutas Mira Hermanos, S.L., productora de granos de granada, para un ensayo industrial durante el cual clasificó automáticamente los granos, en las categorías extra, primera, granos blancos, granos en mal estado (destrío) y pieles o membranas. Los ensayos se prolongaron durante un periodo seis meses.



Figura 8. Sistema de inspección por visión artificial

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Línea de confección para la estimación de la firmeza de melocotones

Fiabilidad. Como resultado de los ensayos, se adquirieron más de 6000 impactos sobre el sensor de firmeza. El programa de gestión de la línea no apreció ninguna pérdida de fruta, esto es, el sensor transmitió datos de firmeza de todas las frutas.

El 1% de los datos transmitidos correspondieron a falsas lecturas del sensor, es decir, la señal obtenida para estos impactos presentaban alguna anomalía. El 75% de los impactos anómalos eran debidos a dobles impactos sobre el sensor, provocados por la forma irregular de la fruta, mientras que el 25% correspondían a la adquisición del final de impacto y no a su totalidad. El primer problema se puede solucionar mediante un análisis más exhaustivo de la señal, de forma que se logren identificar los dos impactos, mientras que el segundo se solucionaría mejorando la etapa de individualización de los melocotones, lo que obligaría al rediseño mecánico del módulo de firmeza.

Repetibilidad. Los ensayos de repetibilidad se llevaron a cabo con muestras aleatorias durante los ensayos de fiabilidad. Las tablas 1 y 2 muestran los resultados obtenidos para las variedades de melocotón Pavía y de nectarina Caldesí-2000. Se obtuvieron resultados muy similares para las otras dos variedades estudiadas. La fruta clasificada en la misma clase durante dos pases consecutivos por la línea era considerada *correcta* mientras que la fruta clasificada por el sistema en dos clases distintas se consideraba como *error*.

Tabla 1. Resultados de repetibilidad para la variedad Pavía

sayo	% correcto	Clase predicha (% correcto)		
		Muy firme	firme	Poco firme
1	88	90	85	90
2	75	82	70	74
3	79	82	76	80

Tabla 2. Resultados de repetibilidad para la variedad Caldesí-2000

sayo	% correct	Clase predicha (% correcta)		
		Muy firme	firme	Poco firme
1	77	79	74	79
2	84	84	81	87
3	78	82	74	80

Los resultados obtenidos permiten asegurar que el sensor presenta una repetibilidad de clasificación de aproximadamente el 80 %. El sensor de firmeza nunca clasificó ninguna fruta muy firme como poco firme y viceversa, esto es, los errores de clasificación detectados se produjeron entre dos clases de firmeza adyacentes.

Si nos centramos en las causas de error, observamos que el 56,6% de la fruta mal clasificada presentaban valores de dureza muy cercanos al límite entre dos clases, el 36,6% de errores se debían a que los frutos no presentaban una firmeza homogénea a lo largo de su superficie. Finalmente, el 6,8% de los melocotones mal clasificados presentaban los dos fenómenos citados.

Sistema para la inspección automática de gajos de mandarina

El promedio de éxito en la clasificación alcanza el 78%. Este porcentaje se eleva hasta el 94% en el caso de la detección de los gajos con semillas y el 94% en la detección de los trozos de piel que viajaban sobre la cinta transportadora. El algoritmo clasificó correctamente el 95% de los gajos enteros y el 77% de los rotos. La principal fuente de error fue la falta de un criterio claro y objetivo de separación entre gajos rotos y enteros en los casos en los que la rotura era de pequeño tamaño, por lo que se deben desarrollar algoritmos más específicos para solucionar este problema. La Tabla 3 muestra la matriz de confusión obtenida. El tiempo promedio requerido por el sistema para analizar una imagen es de 48 ms.

Tabla 3. Matriz de confusión de la clasificación de gajos de satsuma.

Categoría	Entero	Roto	Semilla	Piel	Doble
Entero	95,2%	4,0%	0,7%	0,0%	0,0%
Roto	23,2%	76,8%	0,0%	0,0%	0,0%
Semilla	4,8%	1,2%	94,1%	0,0%	0,0%
Piel	1,9%	3,9%	0,0%	94,2%	0,0%
Doble	21,4%	0,0%	0,0%	0,0%	78,6%

Prototipo para la clasificación de granos de granada

El resultado principal es la creación de un nuevo prototipo para la inspección automática de granos de granada que se ha diseñado y construido completamente en el Centro de Agroingeniería de IVIA. El prototipo incorpora algoritmos de procesamiento de imágenes en tiempo real para la inspección de los granos y la sincronización entre la adquisición de las imágenes, el procesamiento y el control de prototipo para expulsar los granos por la salida asignada a su calidad. El tiempo que necesita el ordenador de visión para analizar cada imagen es, aproximadamente, de 6 ms, aunque la velocidad de trabajo es de unas 12 imágenes/s debido a limitaciones mecánicas.

Durante las pruebas, el prototipo inspeccionó más de 20.000.000 de objetos. Resulta inviable evaluar el resultado individual de la clasificación de cada uno de los granos durante el proceso en línea, debido a su elevada cantidad y a la falta de un criterio objetivo de separación entre las categorías. Se distinguen de manera obvia las membranas de los granos, pero la diferenciación entre las distintas categorías de granos depende, en gran medida, del

experto que realiza la evaluación. Por ello, se optó por evaluar el sistema por la apariencia general de los granos correspondientes a cada categoría tras cada sesión de inspección, antes que por el resultado individual de cada grano seleccionado.

Tras evaluar continuamente y de manera visual la clasificación automática del producto durante la fase de ensayo en la industria, la categoría extra resultó muy bien clasificada mientras que es necesario mejorar el sistema para clasificar correctamente el resto de categorías. Los fallos en la clasificación se debieron, principalmente, a la rápida evolución del color de los granos durante la campaña y al hecho de que los granos viajan demasiado juntos en la cinta transportadora, lo cual produjo que, al expulsar un grano por su salida correspondiente, se expulsaran erróneamente los granos vecinos.

CONCLUSIONES

El Centro de AgroIngeniería del IVIA ha trabajado durante los últimos diez años en el desarrollo de sistemas de inspección y clasificación automáticas con el objetivo de dar respuesta a los nuevos retos tanto tecnológicos como económicos en los que actualmente está inmerso el sector industrial de procesamiento y envasado de productos hortofrutícolas. En este artículo se presentan tres soluciones aportadas por el IVIA a los problemas que presenta la inspección de calidad de tres productos frutícolas de alto interés para la agricultura mediterránea: melocotón, mandarina y granada.

Se ha demostrado que el módulo de firmeza desarrollado para la estimación de la firmeza de melocotones e integrado en una línea de confección pre-comercial es capaz de trabajar a velocidades muy próximas al procesamiento comercial (8 frutas/s). La fiabilidad del sensor ha quedado demostrada al alcanzar niveles de repetibilidad superiores al 80% para la clasificación de dos variedades de melocotones y nectarinas en tres estados de firmeza. Este trabajo demuestra la viabilidad futura de integrar el módulo de firmeza en una línea de confección comercial.

El sistema de inspección de gajos de satsuma por visión artificial es capaz de separar los gajos enteros de los rotos y de los que contienen semillas. Además es capaz de detectar y separar las pieles que viajan junto con los gajos debido a fallos en el sistema de pelado de la fruta, asegurando una calidad óptima del producto final. El sistema inspecciona los gajos en tiempo real, procesando las imágenes a un promedio de 48 ms por imagen.

Con el prototipo de inspección de granos de granada se ha obtenido un nuevo producto, inexistente en el mercado, de alto valor añadido y con una calidad óptima debido al sistema de inspección por visión artificial. El prototipo se ha diseñado y construido en el IVIA y se ha probado durante varios meses en la industria, analizando más de 20 millones de granos.

AGRADECIMENTOS

Los trabajos de investigación descritos en el artículo han sido financiados parcialmente por la UE a través de los contratos QLK1-CT-2002-70791 y QLK1-2000-70106, por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) a través de los proyectos RTA03-105 y TRT2006-00046-00-00 y por las empresas Frutas Mira Hermanos, S.L., Agriconsa, S.A. y Fomesa, 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*, **Vol.**(33) 2 (2002) 121-137.
- Blasco J., Aleixos N., Moltó E., 2003, Machine Vision System for Automatic Quality Grading of Fruit. *Biosystems Engineering Vol.*(85) 4 pp. 415-423.
- Blasco J, Cubero S., Mira S., Moltó E., 2006, Prototype for the automatic inspection of pomegranate arils by means of computer vision. XVI CIGR World Congress: agricultural engineering for a better world. Book of abstracts. Bonn, Germany, pp. 691-692.
- Blasco J, Aleixos N, Moltó E, 2007, Computer vision detection of peel defects in citrus by means of a region oriented segmentation algorithm. *Journal of Food Engineering* 81(3), 535-543
- Burgos, J.A.; Gutierrez, A.; Moltó, E., 2002, A firmness sensor for assessing texture in fruit. International Conference on Agricultural Engineering, AgEng 02, Budapest, Hungria, EurAgEng Paper N°.: 02-PH-025.
- Galindo M.; López J.A. Contreras L.A. Tomás L.M., 1997, Defects modelling through artificial vision techniques, applied to satsuma and tangerine slices quality control. Robotics and automated machinery for bio-productions, BIO-ROBOTICS 97. Gandía (Valencia) pp. 89-94.
- Gutierrez, A.; Ramos, P.; Moltó, E., 1999. Desarrollo de una máquina para la detección de mandarinas bufadas basada en sensores de firmeza. VIII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas. *Actas de Horticultura*. 27: 67-71.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, MAPA, 2002, Hechos y Cifras del Sector Agroalimentario y del Medio Rural Español. Madrid 2002.
- Torres R.; Tomás L.M.; López J.A.; Doménech G., 1994, Automatic vision inspection system for the analysis and detection of breakages and defects of satsuma slices. *Proceeding of the International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, San Antonio (EE.UU.) pp. 853-858.