



Disponible en [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 9 (2012) 93–104



[www.elsevier.es/RIAI](http://www.elsevier.es/RIAI)

## Detección de Defectos en Carrocerías de Vehículos Basado en Visión Artificial: Diseño e Implantación

Josep Tornero<sup>a</sup>, Leopoldo Armesto<sup>a</sup>, Marta C. Mora<sup>b</sup>, Nicolás Montés<sup>c</sup>, Álvaro Herráez<sup>d</sup>, José Asensio<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Diseño y Fabricación (IDF), Universidad Politécnica de Valencia, C/Camino de Vera s/n, 46022 (Valencia)

<sup>b</sup>Departamento Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I, Av. Vicente Sos Baynat s/n, 12071 (Castellón de la Plana)

<sup>c</sup>Escuela Superior de Enseñanzas Técnicas, Universidad CEU Cardenal Herrera, Ed. Seminario 46113 (Moncada)

<sup>d</sup>Planta de Pinturas, Ford Polígono Industrial s/n 46440 (Almussafes)

### Resumen

Este artículo describe el diseño e implementación de un novedoso sistema de inspección basado en visión artificial para detectar defectos en carrocerías de vehículos automóviles. El sistema ha sido implantado en la factoría Ford de Almussafes (Valencia) como consecuencia de varios proyectos de I+D entre Ford España, S.A. y el Instituto de Diseño y Fabricación de la Universidad Politécnica de Valencia que han derivado en dos patentes internacionales. El sistema se basa en la detección de defectos mediante un barrido de iluminación, estando el sistema de visión fijo, al igual que el objeto a inspeccionar. Tras la adquisición de las imágenes, los defectos se detectan como consecuencia de las transiciones generadas por el barrido de iluminación al verse deformado el patrón de reflexión. La alta sensibilidad del sistema permite detectar defectos milimétricos de 0.2mm de diámetro, gracias al efecto de amplificación causado por el propio barrido de iluminación. La principal innovación introducida por este proyecto industrial reside en el hecho del que el sistema es capaz de detectar casi el 100 % de los defectos detectados mediante inspección humana. Esto ha supuesto mejoras significativas en la reducción del número de vehículos rechazados, además de una reducción del consumo energético, pintura utilizada, del menor impacto medioambiental y por supuesto una reducción en los costes de producción. El sistema también ha supuesto una mejora de las condiciones laborales de los trabajadores al reducirse los problemas como la fatiga ocular. En la actualidad el sistema está siendo rediseñado para su implantación y explotación en otras factorías Ford a nivel mundial con varios modelos de vehículos. Copyright © 2012 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

**Palabras Clave:** Automobile industry, Quality Control, visual pattern recognition.

### 1. Introducción

En una gran mayoría de sectores industriales, los productos finales han de ser tratados con diferentes capas de pintura, siendo la calidad un aspecto especialmente crítico en la industria del automóvil. Los procesos de pintado automático se realizan normalmente de forma continua, con las carrocerías moviéndose a lo largo de la línea de producción de una estación a otra. Las capas de pintura se aplican de forma electroestática bajo condiciones de temperatura, humedad y ausencia de polvo estrictamente controladas. En este contexto, los defectos de pintura aparecen como una inevitable variación de las condiciones óptimas de operación o causadas por polvo, agresiones ocasionales causadas por los propios trabajadores, etc. Los defectos son, en realidad, alteraciones en una capa en que crecen y se hacen más visibles conforme se aplican capas adicionales de pintura.

Correos electrónicos: [jtornero@isa.upv.es](mailto:jtornero@isa.upv.es) (Josep Tornero), [leoaran@isa.upv.es](mailto:leoaran@isa.upv.es) (Leopoldo Armesto), [mmora@emc.uji.es](mailto:mmora@emc.uji.es) (Marta C. Mora), [nicolas.montes@uch.ceu.es](mailto:nicolas.montes@uch.ceu.es) (Nicolás Montés)

Tradicionalmente, los defectos se localizan, marcan y reparan en una etapa posterior al proceso de pintado. En ocasiones, los defectos son claramente visibles y detectables, como es el caso de golpes y rayas, mientras que en otros casos, los defectos pueden ser en realidad pequeñas partículas muy difíciles de detectar.

En algunos casos, la situación puede ser grave ya que la no detección del defecto en factoría da lugar al rechazo del vehículo por parte del cliente al no cumplirse las expectativas de calidad. En consecuencia, la imagen de marca de la empresa y la satisfacción del cliente se ven drásticamente afectados. No obstante, aunque se detectara en fabrica, sería necesario un nuevo repintado del vehículo. Además, la no detección de los defectos en las primeras etapas del proceso de pintado, supone un incremento de costes por el mayor consumo de pintura y energía y su consecuente impacto medioambiental.

En la típica planta de pintura, el sellado y encerado se aplican para proporcionar protección frente al agua, previniendo corrosiones prematuras de la carrocería del vehículo. La impor-



Figura 1: Tunel de inspección de Ford en Almussafes (España).

tancia de este problema reside en el hecho de que la corrosión constituye una forma de reducción de la vida útil del producto.

Hoy por hoy, la gran mayoría de factorías incorporan operarios expertos que inspeccionan el producto para detectar defectos. No obstante, a partir de la selección y análisis minucioso y aleatorio fuera de línea de los vehículos, se ha podido constatar que el 80 % de los defectos pequeños no son correctamente detectados. El principal motivo de esta tasa de fallo tan elevada se debe sobretodo a la fatiga ocular que sufren los operarios.

Este artículo describe el diseño e implementación de un novedoso sistema de inspección basado en visión artificial para detectar defectos en carrocerías de automóviles. El sistema ha sido implantado en la factoría Ford de Almussafes (Valencia) como consecuencia de varios proyectos de I+D entre Ford España, S.A. y el Instituto de Diseño y Fabricación de la Universidad Politécnica de Valencia que ha derivado la patente internacional Prior *et al.* (2010) explotada por la propia empresa. En la Figura 1 se muestra el aspecto del túnel de inspección diseñado. El artículo, además, describe los fundamentos científico-técnicos en los que se fundamenta el túnel de inspección.

El sistema se basa en el principio de detección de defectos mediante la generación de un barrido de iluminación, estando el sistema de visión (cámaras) fijo, al igual que el vehículo a inspeccionar. Tras la adquisición de las imágenes de barrido de iluminación, se realiza un procesamiento que permite detectar y clasificar defectos de hasta 0.2mm de diámetro. La clave reside en el denominado efecto de amplificación como consecuencia de las sombras generadas en los alrededores del defecto aumentando el tamaño del reflejo en la superficie.

La principal innovación introducida por este proyecto industrial reside en el hecho de que el sistema es capaz de detectar casi el 100 % de los defectos detectados mediante inspección humana. El sistema es capaz de detectar defectos milimétricos tanto en la parte superior (capó, techo y maletero) como en los laterales (aletas delanteras y traseras y puertas), cubriendo así las partes más importantes de la carrocería del vehículo. Véanse los videos en IDF (2009) para una demostración visual del sistema completo en funcionamiento. En la actualidad el sis-

tema está siendo rediseñado para su implantación y explotación en otras factorías Ford a nivel mundial. Remarcarse que la aplicabilidad de los resultados obtenidos podrían extenderse a la detección de otro tipo de productos tales como electrodomésticos, vagones, cascos de barco, elementos estructurales en aviones, etc., con el adecuado redimensionamiento y reconfiguración.

El artículo se organiza de la siguiente manera: a continuación se realiza un estado del arte sobre soluciones de inspección propuestas hasta la fecha; en la Sección 2 se presenta la metodología de experimentación que nos ha llevado al diseño e implementación del túnel de inspección, mientras que las Secciones 3 y 4 describen en detalle tanto los criterios de diseño mecánicos del túnel como la algorítmica utilizada en el proceso de detección, seguida de la Sección 5 de resultados. El artículo acaba con las típicas secciones de conclusiones y referencias.

### 1.1. Estado del Arte

Esta sección se plantea inicialmente como un estado del arte de las pocas propuestas industriales existentes para la detección automática de defectos en carrocerías de vehículos automóviles, con la discusión de las patentes existentes y su diferenciación con respecto a la propuesta planteada en este artículo. Seguidamente, se estudian los trabajos de investigadores, que si bien no se tiene constancia de su aplicación industrial, si que han supuesto interesantes aportaciones en este ámbito.

La patente Imanishi *et al.* (1998) describe un aparato para la detección de defectos en vehículos que utiliza un sistema de sensores fotosensibles (cámaras) para captar las variaciones de luz que genera un patrón en movimiento. En esta patente, la configuración de las cámaras y tubos es distinta a la propuesta ya que las cámaras están por delante de los tubos de iluminación, además de utilizar patrones para ocultar los reflejos de un sistema de iluminación difusa en forma de arco. Si bien, la principal diferencia es el hecho de que para conseguir los reflejos en toda la superficie del vehículo, éste debe estar en movimiento durante la captura de imágenes, impidiendo detectar microdefectos debido a las vibraciones ocasionadas por dicho movimiento. Como las cámaras y las luces son fijas, los defectos en las imágenes se mueven y debe aplicarse complejos algoritmos de seguimiento de las sucesivas imágenes para detectar el defecto.

La patente Alders *et al.* (2000) presenta un sistema de detección de defectos en carrocerías antes del proceso de pintado utilizando técnicas metrológicas basadas en reconstrucción 3D de la carrocería mediante la proyección de haces de luz laser sobre la carrocería captadas por cámaras CCD.

Asimismo, la patente Clarke (1990) describe un sistema de detección de defectos en superficies metálicas o plásticas como resultado de la manipulación de los materiales, transporte, montaje, pero en cualquier caso antes del proceso de pintado. En ambos casos, sólo se detectan los defectos de chapa que posteriormente serán visibles con el pintado y lacado de la carrocería. No obstante, esta patente muestra diferentes configuraciones en las que una cámara puede estar ubicada en un brazo robot y el sistema de iluminación fijo o viceversa.

Por otro lado, en el ámbito de la investigación, las universidades alemanas de Karlsruhe y Munich utilizan una técnica

de reflexión donde el objeto forma parte del sistema óptico. La visión se centra en el patrón proyectado y no en la superficie. Esta técnica se conoce como deflectometría. Esta reproduce el comportamiento del experto que examina la superficie, esto es, observar y evaluar patrones conocidos en la superficie inspeccionada. Manejan distintos patrones de luz estructurada, aunque no con objeto de hacer una reconstrucción 3D, para la detección de defectos de curvatura local de planos cromados y para la inspección de piezas de automóvil, Perard and Beyerer (1997); Leon and Kammel (2003), si bien en la actualidad trabajan en stereo-deflectometría Balzer *et al.* (2011). En Kammel and Leon (2005a); Leon and Kammel (2006); Kammel and Puente Leon (2003) profundizan en la inspección de superficies estructuradas, concretamente membranas de sensores de presión, y de superficies pintadas de automóvil mediante la fusión de imágenes obtenidas de la reflexión de diferentes iluminaciones en las superficies, Kammel and Leon (2005b) dando como resultado la imagen con defectos. Por último, en Kammel (2002) se desarrollan simulaciones que le permite obtener diversas configuraciones del sistema de reflexión.

La investigación desarrollada en el laboratorio LE2I (Laboratoire d'Electronique, d'Informatique et d'Image) de la Universidad de Borgoña utiliza un patrón dinámico binario para la inspección de los defectos geométricos Seulin *et al.* (2002b, 2001). El sistema permite la detección de defectos en superficies no planas Aluze *et al.* (2002). Debido al sistema de iluminación, patrón binario, cuando el defecto está en las proximidades de la transición, éste se ilumina donde el área ocupada es la del tamaño del defecto. Esta técnica funciona tanto, si el defecto está en la franja binaria oscura, defecto iluminado, como si el defecto está en la zona oscura, defecto oscuro. También está siendo utilizada para la inspección de superficies transparentes Martínez *et al.* (2010). En la misma línea, en Seulin *et al.* (n.d.); Seulin *et al.* (2002a) proponen un simulador de ayuda para la concepción de las condiciones de la adquisición de las imágenes, en cuanto a los parámetros de la iluminación que plantean: ancho de las franjas, cantidad de imágenes en la secuencia, etc. El patrón dinámico se desplaza sobre la pieza y las imágenes son fusionadas mediante la media aritmética, dando como resultado una imagen resultante con los defectos.

El diseño de la iluminación y la configuración del sistema óptico adecuado permite realizar los defectos de las superficies reflectantes, o reducir los efectos de las reflexiones especulares, por ejemplo a través de iluminación difusa, Kuhlmann (1995); Li *et al.* (2005). Pernkopf and O'Leary (2003) nos muestran cómo en la inspección de productos metálicos (en este caso del acero), la elección de las condiciones establece la eficacia del sistema: determinan las características de los defectos que se pueden detectar, la naturaleza de la superficie y la resolución espacial requerida. Para ello, utilizan tres métodos de adquisición, con diferentes condiciones, para formar imágenes de intensidad con distinta iluminación, *Bright Field* y *Dark Field*, y de rango, estéreo fotométrico y láser. Las peculiaridades de esta inspección dificultan el aprovechamiento de algunas técnicas de visión artificial, tanto de adquisición como de procesamiento, orientadas a la extracción de características de los defectos u objetos. El modelo más utilizado es definir los defectos

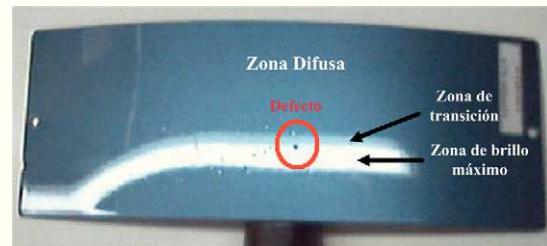


Figura 2: Reflejo basado en tubo fluorescente de alta frecuencia sobre superficie metálica especular y defecto marcado en rojo.

como campanas de Gauss de revolución, o concatenación de estas, Seulin *et al.* (2002b); Seulin *et al.* (2002a); Li (2006); Azorín López (2007). Al ser un levantamiento de la superficie pintada, los defectos tienen las mismas propiedades especulares que la superficie en la que se encuentran, reflejando la luz incidente en ellos en la dirección especular.

## 2. Metodología de experimentación

Inicialmente se estudió el problema y se determinaron las variables que condicionaban el diseño físico del sistema inspección automática de carrocerías:

1. Velocidad de la cadena de transporte: 100 mm/s.
2. Ancho máximo de la zona a inspeccionar: 1700 mm.
3. Tamaño del defecto tipo: 0.2 mm de diámetro.
4. Tiempo máximo de inspección: 10s.
5. Tiempo de ciclo de la cadena: 20s.

En base a estas especificaciones, se diseñó el sistema de inspección, formado por tres subsistemas: adquisición, iluminación y procesamiento para inspeccionar una parte específica de la carrocería. En esta sección se aborda la metodología de diseño de los dos primeros subsistemas, junto con su estructura de soporte. Cabe destacar que uno de los mayores retos en este proyecto ha consistido en diseñar un adecuado sistema de iluminación, clave para el éxito del sistema de inspección pues ha permitido simplificar considerablemente la fase de procesamiento de imágenes.

### 2.1. Prediseño del Sistema de Iluminación

El diseño del subsistema de iluminación requería de un estudio de la reflexión de la luz en las chapas metálicas, realizado a partir de medidas de un luxómetro. Debido a la capa externa de laca que lo impregna, se constató que la respuesta a la luz de este material es poco difusa y muy especular. La detección de defectos se basa en conseguir que la iluminación incida sobre el defecto de manera que permita distinguirlo nítidamente.

Se procedió entonces a aplicar técnicas de deflectometría óptica estudiando con detenimiento la inspección realizada por los operarios expertos de la factoría Ford. Éstos utilizaban tubos fluorescentes en la detección de defectos, analizando visualmente la zona de la carrocería en la que el tubo producía un reflejo. En la Figura 2 se aprecian tres zonas diferenciadas en el reflejo de un tubo fluorescente de alta frecuencia sobre una placa de prueba: a) *zona de brillo máximo*, que se corresponde

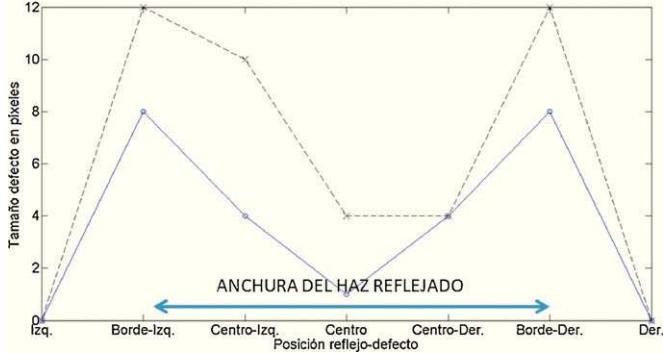


Figura 3: Efecto de amplificación en los bordes del ancho de haz. La línea continua representa el caso de defectos de 0.2mm, mientras que la línea discontinua es para defectos de 0.3mm.

con la proyección del tubo sobre la superficie pintada; b) *zona de transición*, debida a los reflejos que produce la luminaria del tubo fluorescente; c) *zona difusa*, que es el área iluminada por la luz ambiental y la iluminación difusa de la lámpara.

Durante la experimentación, se constató que es en la zona de transición donde los defectos se visualizan en mayor magnitud. Este resultado también se cita en la investigación desarrollada por el laboratorio LE2I Seulin *et al.* (2002b, 2001); Aluze *et al.* (2002); Seulin *et al.* (n.d.); Seulin *et al.* (2002a), donde indican que el defecto alcanza su tamaño máximo en estas zonas. Por tanto, se diseñó el sistema de inspección para que los tubos fluorescentes barrieran toda la carrocería dando lugar a un conjunto de imágenes que se fusionan (superponen) para formar una imagen resultante los defectos amplificados. En la Figura 3 se muestra el tamaño de defecto medido medio en función de la posición de dicho defecto con respecto al haz reflejado tanto para defectos de 0.2mm como 0.3mm. Se aprecia que el defecto alcanza su valor máximo observado cuando el haz reflejado está en los bordes del defecto. Por la tipología de los microdefectos este efecto se puede modelar mediante dos gaussianas, cuyos valores máximos están localizados en los bordes del ancho de haz. Cabe remarcar que los valores obtenidos corresponden a mediciones realizadas de forma visual con instrumentación adecuada para poder observar con mayor tamaño el defecto. Por tanto las mediciones son estimativas, y pueden no ser concluyentes, si bien se trata de una pauta sistemática.

Este efecto, se mantiene también al combinar sucesivas imágenes y realizar un barrido de iluminación. De hecho, con esta técnica, se consigue detectar defectos de tamaño sub-píxel. Tal y como muestran los resultados experimentales de la Tabla 1 se detectan defectos de diámetros 0,2 mm, 0,3 mm y 0,6 mm (medidos con una lupa de precisión). Esta resolución  $R$  se ha mantenido constante en toda la experimentación relacionando las alturas de las distintas cámaras y con las distancias focales de sus ópticas:

$$h = \frac{R \cdot f \cdot CCD_{u(px)}}{CCD_{u(mm)}} + f \quad (1)$$

donde  $h$  es la altura de la cámara,  $f$  la distancia focal en milímetros,  $CCD_{u(mm)}$  el tamaño del CDD en milímetros en la dirección de medida y  $CCD_{u(px)}$  su tamaño en píxeles en la imagen.

$d_r$ [mm]	$d_o$					
	$f = 8[\text{mm}]$		$f = 12[\text{mm}]$		$f = 16[\text{mm}]$	
	[mm]	[px]	[mm]	[px]	[mm]	[px]
0,2	1,738	2	1,738	2	1,738	2
0,3	2,607	3	2,607	3	2,607	3
0,6	3,476	4	5,214	6	5,214	6

Tabla 1: Tamaño real ( $d_r$ ) y observado ( $d_o$ ) de defectos, en milímetros y píxeles, según la óptica para  $R = 0,896 \text{ mm}/\text{px}$ .



Figura 4: Estructura porticada para experimentación.

En concreto, en la Tabla 1, para una resolución dada de  $R = 0,896 \text{ mm}/\text{px}$  se ha obtenido valores de  $h = 1100 \text{ mm}$  para  $f = 8 \text{ mm}$ ,  $h = 1650 \text{ mm}$  para  $f = 12 \text{ mm}$  y  $h = 2200 \text{ mm}$  para  $f = 16 \text{ mm}$ . Se observa que para, esta resolución, y en la mayoría de los casos se obtiene una relación constante en la amplificación de entorno a  $K = 9$  veces entre el tamaño del defecto observado  $d_o$  y el real  $d_r$ . Con ello, defectos del tamaño real de entre 0,2mm y 0,3mm se observan en la imagen como defectos con un tamaño observado entre 1,8mm y 2,7mm que se corresponde con 2 o 3 píxeles en la imagen. Si tenemos en cuenta que el haz debe de envolver al defecto debemos seleccionar un tamaño de haz reflejado de al menos el doble del defecto que se quiera medir. En nuestro caso, elegimos un tamaño de unos  $n = 6$  píxeles que corresponde a una separación entre tubos de iluminación y superficie de  $D = 800 \text{ mm}$  para tubos de  $d = 16 \text{ mm}$  de diámetro, para una altura  $h = 1100 \text{ mm}$ , según la siguiente relación geométrica:

$$\frac{h + D}{d} = \frac{h}{n \cdot R \cdot K} \quad (2)$$

En base a los planteamientos anteriores, se diseñó y construyó un sistema experimental consistente en un robot cartesiano (Figura 4), en el que el sistema de iluminación se componía de un array de tubos fluorescentes (inicialmente 2 tubos) en desplazamiento a lo largo de la superficie.

Previo a la experimentación, se realizó un estudio de las tecnologías de adquisición de imágenes disponibles en el mercado, teniendo en cuenta diferentes aspectos tales como el tipo de transductor, la velocidad de adquisición, la interfaz de comunicación, la resolución por píxel, la óptica a utilizar y evidentemente el precio. Se constató que las cámaras CCD ofrecen menor ruido intrínseco en la imagen que las CMOS a pesar de su alta velocidad de adquisición. Así mismo, se probó con cámaras con diferentes interfaces como Firewire, CameraLink

o Gigabit Ethernet. Se constató que estas dos últimas ofrecían suficiente velocidad de adquisición de 15fps para imágenes de alta resolución, de lo contrario, el tiempo para realizar un barrido aumenta significativamente. Como consecuencia de este estudio, para la experimentación se utilizó una cámara CCD Dolphin F145B con un sensor de 2/3" y una resolución 1392×1040.

### 3. Configuración de Cámaras y Luces

La solución industrial propuesta implica que la luz debe de pasar por delante o detrás de las cámaras, generando para el primer caso una oclusión por los propios elementos de sujeción del tubo de iluminación, mientras que para el segundo caso la cámara y sus elementos de sujeción generan una sombra sobre la superficie. Como consecuencia, aparece una zona, en la normal de la superficie, en la que no se tiene reflejo. Esto representa un problema fundamentalmente de tipo económico ya que lo deseable es poder inspeccionar una zona con una única cámara dado que son extremadamente caras si consideramos todo el hardware y software asociado. Así pues, se ha determinado inspeccionar las siguientes zonas: el capó, el techo, el maletero, las aletas delanteras y traseras y las puertas puertas delanteras y traseras. Además, se debe tener en consideración que la separación de la cámara con respecto a la superficie y su inclinación afecta significativamente a la resolución, esto es, el tamaño con el que se ven los defectos de un mismo tamaño y que ésta debe ser garantizada. Por tanto, una configuración inadecuada no sólo es aquella en la que aparece una oclusión, si no que la resolución es insuficiente para garantizar detectar defectos de la resolución requerida.

Con objeto de resolver el problema de configuración, reseñamos el hecho de que nos encontramos ante un problema en el que se puede modificar la posición 3D de las cámaras en relación a la superficie a inspeccionar, si bien una de las coordenadas se selecciona de manera que la imagen esté lo más centrada posible, con lo que ésta no formará parte de los parámetros de diseño. Por otro lado, de las tres orientaciones en el espacio 3D normalmente dos de ellas son fijas, pues de lo contrario se obtendrían imágenes con peores resoluciones de forma innecesaria. La tercera coordenada en la orientación, con respecto a la normal de la superficie, permite modificar la perspectiva con la que se observa dicha superficie.

En los siguientes apartados se describen dos configuraciones concretas de cámaras y luces. En una primera etapa aproximamos las superficies de la carrocería a planos tangentes a cada una de las zonas a inspeccionar, que nos proporciona un punto de partida para su posterior optimización y validación mediante herramientas CAD. Por tanto, los cálculos descritos son relativos a los planos tangentes de cada zona, pudiendo de forma arbitraria inclinar los planos con objeto de inspeccionar mejor determinadas zonas de interés, especialmente en el capó y del maletero.

#### 3.1. Configuración con una cámara

Esta configuración se aplica a capó, maletero y aletas, ya que presentan todas ellas una problemática similar. En este caso, la cámara debe posicionarse inclinada con respecto a la nor-

mal de la superficie con objeto de evitar la auto-ocultación generada por el sistema de iluminación tal y como se aprecia en la Figura 5(a). Asumimos un modelo pin-hole tal que la posición del foco es  $(x_c, y_c)$  y el campo de visión viene dado por los ángulos  $\beta_u = 2 \arctan(\frac{CCD_u(mm)/2}{f})$  y  $\beta_v = 2 \arctan(\frac{CCD_v(mm)/2}{f})$ , siendo  $CCD_u(mm)$ ,  $CCD_v(mm)$  el tamaño del CCD (según como esté orientada la cámara) y  $f$  la distancia focal. Por tanto, la inclinación la cámara  $\gamma_c$ , que garantiza la ausencia de oclusión, es la mitad del campo de visión  $\beta_u$  más un pequeño ángulo  $\gamma$  que permite evitar la auto-ocultación del tubo de iluminación. La posición del foco viene determinada por el comienzo de la zona a inspeccionar y la separación de la cámara  $h$  con respecto a la superficie vendrá dada por la zona máxima a inspeccionar, definida por rectángulo con dimensiones  $w \times l$  y centro  $(x_o, y_o)$  la configuración de la cámara para el caso de una sola cámara es:

$$\gamma = \arctan(r/h_l) \quad (3)$$

$$h = \max((w/2+s)/(\tan(\beta_v/2)), (l+2s+(r/h_l)h)/(\tan(\beta_u + \gamma))) \quad (4)$$

$$x_c = x_o - l/2 - s - (r/h_l)h \quad (5)$$

$$y_c = y_o \quad (6)$$

$$\gamma_c = \beta_u/2 + \gamma \quad (7)$$

siendo  $h_l$  la altura del tubo de iluminación,  $r$  el radio envolvente de la estructura de iluminación y  $s$  es el margen adicionales que engranda la zona real de inspección. La ecuación (4) debe resolverse mediante un proceso iterativo, como por ejemplo el método del punto fijo.

Mediante esta configuración, podemos llegar a iluminar desde la posición en la que el tubo de iluminación está en  $x_{l,0} = x_o - \frac{l}{2} - s + r$ , tal y como se aprecia en la Figura 5(a). En esta posición, el reflejo del tubo sobre la superficie está justo al comienzo de la zona a inspeccionar. Por otro lado, el tubo realiza un barrido de al menos  $Q = (l+2s)\frac{h_l+h}{h}$  que permite que el reflejo se genere justo al final de la zona a inspeccionar.

La curvatura del capó en la parte frontal impide que se pueda detectar defectos en esa zona salvo que se tengan en consideración la colocación de más cámaras y consecuentemente de la iluminación asociada. Este tipo de planteamientos quedaron descartados por resultar inviables.

#### 3.2. Configuración con dos cámaras

El techo y las puertas son las zonas más críticas a inspeccionar, pues cualquier defecto resulta muy visible, al igual que en el capó. Pero además, en este caso se requiere de dos cámaras para poder inspeccionar las zonas, debido a su mayor tamaño, lo que dificulta el posicionamiento de las cámaras.

En este caso, la solución propuesta pasa por contraponer las cámaras tal y como se muestra en la Figura 5(b). Cada zona a inspeccionar se divide en dos, la parte trasera cuyas variables asociadas incluyen el subíndice 1 y la parte delantera con el subíndice 2. Concretamente, para el caso del techo, se divide en dos, de forma que cada cámara será al menos capaz de inspeccionar la mitad del techo para cada una de las carrocerías. Esto implica calcular el centro geométrico y el tamaño de la zona a inspeccionar:

$$x_{o1} = (\max(x'_{o,i} + l'_i/2) + \min(x'_{o,i})) / 2 \quad (8)$$

$$l_1 = \max(x'_{o,i} + l'_i/2) - \min(x'_{o,i}) \quad (9)$$

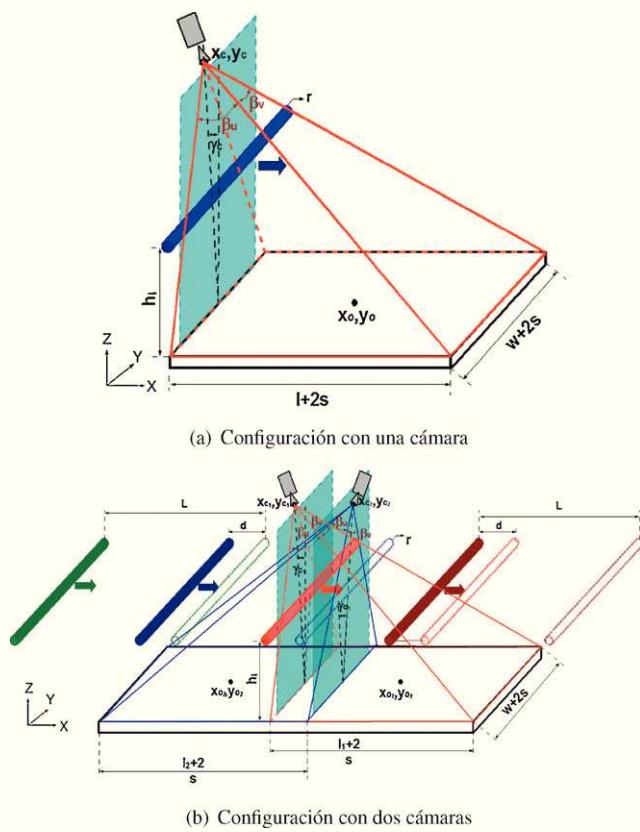


Figura 5: Configuración de la cámaras e iluminación.

$$x_{o2} = \left( \min(x'_{o,i} - l'_i/2) + \max(x'_{o,i}) \right) / 2 \quad (10)$$

$$l_2 = \max(x'_{o,i}) - \min(x'_{o,i} - l'_i/2) \quad (11)$$

siendo  $\{x'_{o,i}, y'_{o,i}\}$  el centro geométrico de cada una de las partes del techo del vehículo y  $\{l'_i\}$  sus longitudes. Se asume que todos los vehículos están centrados sobre el eje longitudinal de la línea de producción y por tanto  $y_{o1} = y_{o2} = y_{o,i}$ . Para el caso de las puertas se puede obtener unas expresiones similares de manera que se garantice que la cámara 2 es capaz de inspeccionar todas las posibles puertas delanteras y la cámara 1 es capaz de inspeccionar todas las posibles puertas traseras.

Para obtener la configuración de cada una de las cámaras se tiene una solución similar a las ecuaciones (3)–(7):

$$h_1 = \max \left( \frac{w/2 + s}{\tan(\beta_v/2)}, \frac{l_1 + 2s + (r/h_l)h_1}{\tan(\beta_u + \gamma)} \right) \quad (12)$$

$$h_2 = \max \left( \frac{w/2 + s}{\tan(\beta_v/2)}, \frac{l_2 + 2s + (r/h_l)h_2}{\tan(\beta_u + \gamma)} \right) \quad (13)$$

$$x_{c1} = x_{o1} - l_1/2 - s - (r/h_l)h_1 \quad (14)$$

$$y_{c1} = y_{o1} \quad (15)$$

$$\gamma_{c1} = \beta_u/2 + \gamma \quad (16)$$

$$x_{c2} = x_{o1} + l_2/2 + s + (r/h_l)h_2 \quad (17)$$

$$y_{c2} = y_{o1} \quad (18)$$

$$\gamma_{c2} = -\beta_u/2 - \gamma \quad (19)$$



Figura 6: Monitorización de los defectos en la zona de reparación.

siendo  $(x_{c1}, y_{c1})$  la posición de la cámara 1 con una inclinación  $\gamma_{c1}$  con respecto a la normal de la superficie y  $(x_{c2}, y_{c2})$  y  $\gamma_{c2}$  las correspondientes variables para la cámara 2.

Con objeto de evitar los problemas de la auto-ocultación, las cámaras están inclinadas (de forma contrapuesta) con respecto a la normal de la superficie, al igual que para el caso de una sola cámara. La principal diferencia reside en que ahora debemos tener en consideración que el barrido de un tubo de iluminación, cuyo reflejo sirve para una de las cámaras puede ocluir el reflejo de otro tubo en la imagen de la otra cámara. La solución propuesta a este problema pasa por la incorporación de más tubos de iluminación de manera que debidamente sincronizados los movimientos se generen reflejos como consecuencia de los nuevos tubos, cubriendo así la zona a inspeccionar. Esta solución tiene como principales ventajas que permite además reducir el tiempo del barrido, ya que el barrido efectivo se reparte entre el número de tubos incorporados. Para ello, la solución pasa por decalar los tubos de iluminación consecutivos de forma que la posición final de un tubo está separada una distancia  $d = (x_{o,1} - l_1/2 - s + r) - (x_{o,2} + l_2/2 + s - r)$  con la posición inicial del siguiente tubo, tal y como se aprecia en la Figura 5(b). Este procedimiento se puede extender de forma iterativa para incluir más tubos de iluminación de forma que el recorrido se acorta y consecuentemente el tiempo del barrido para una misma velocidad.

#### 4. Descripción del Túnel de Inspección

El túnel de inspección está compuesto por cámaras de visión y arcos de iluminación para la detección de defectos en superficies especulares. Cada arco de iluminación está formado por varios tubos de iluminación de alta frecuencia en forma octogonal. El barrido de iluminación permite iluminar toda la superficie de interés, estando las cámaras y el objeto a inspeccionar estáticos en todo momento, moviéndose el sistema de iluminación por delante de las cámaras.

El sistema de inspección mostrado en la Figura 1, está localizado justo después de los hornos de pinturas dentro de la propia cadena de fabricación. Tras ser inspeccionados, los vehículos pasan por la fase de reparación, en la que los defectos se monitorizan para facilitar la localización de los mismo, tal y como se muestra en la Figura 6.

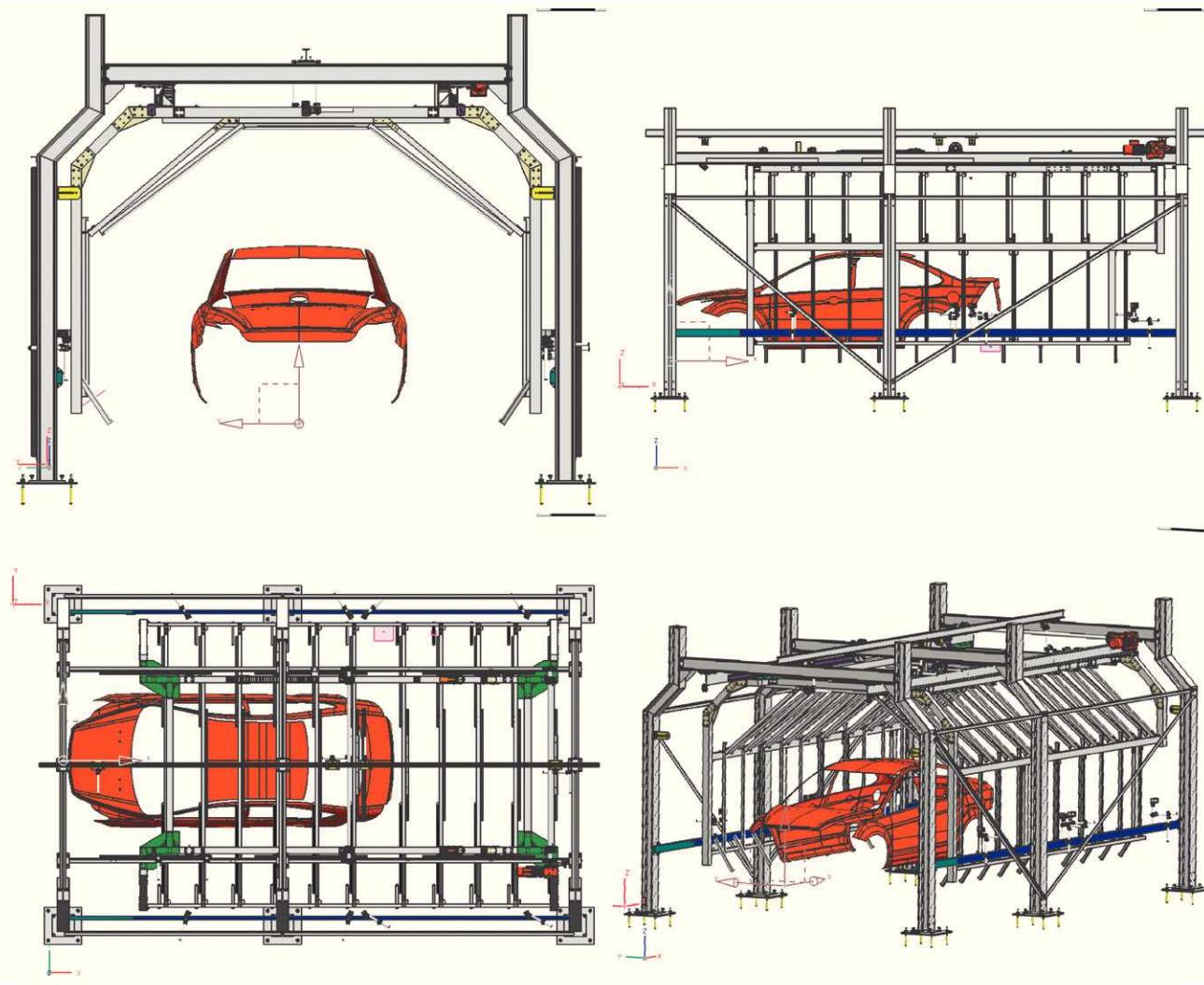
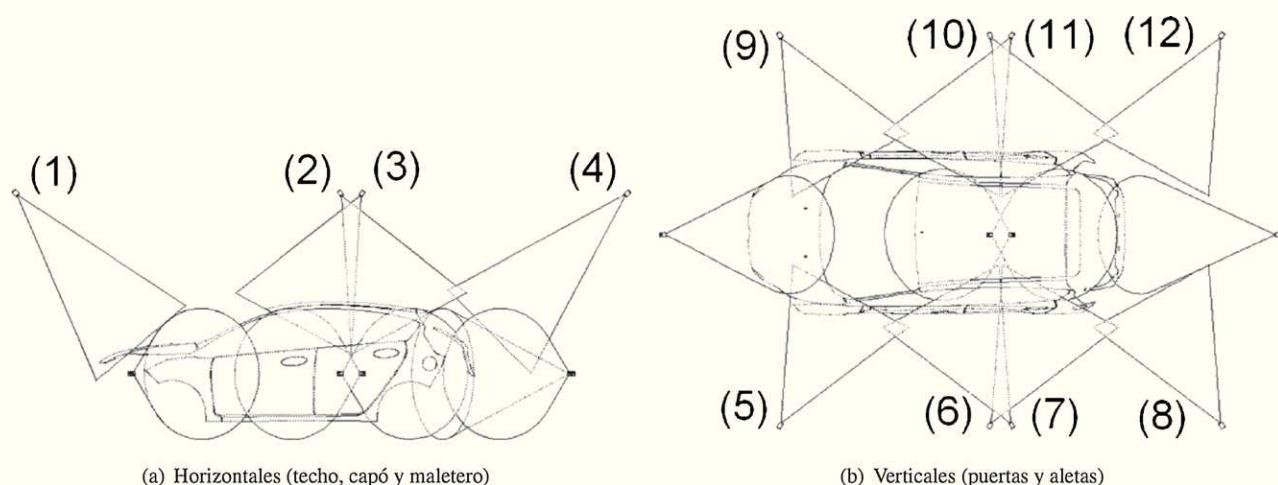


Figura 7: Vistas del túnel de inspección diseñado.



(a) Horizontales (techo, capó y maletero)

(b) Verticales (puertas y aletas)

Figura 8: Ubicación de las cámaras (y conos de visión).

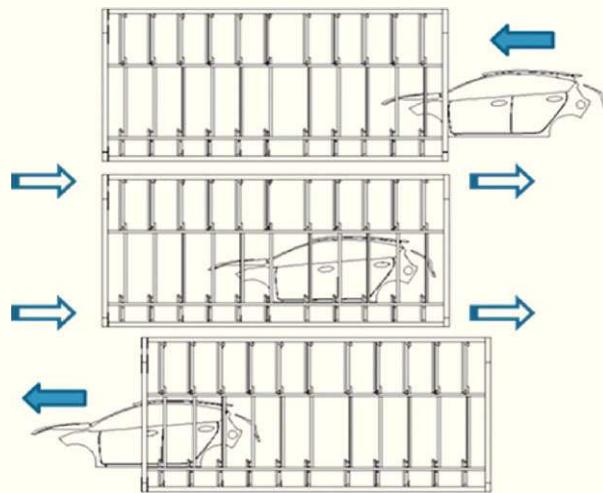


Figura 9: Secuencia de Movimientos del Arco de Iluminación.

#### 4.1. Diseño del Túnel

Se ha desarrollado una metodología en la que es posible diseñar sistemas de inspección totalmente adaptados al tipo de objeto a inspeccionar combinando conjuntamente, y sin occlusiones, subsistemas de visión con subsistemas de iluminación móviles. Para ello, debemos contemplar el hecho de que las cámaras del subsistema de visión están inclinadas con respecto a la normal de la superficie de forma que los prismas de visión (o frustum) cubren parte o toda la superficie. El movimiento sincronizado de los tubos del subsistema de iluminación produce un reflejo que barre la superficie cubierta por los prismas de visión. Este barrido, cuyos haces se desplazan entre dos paredes opuestas de los prismas de visión (o abusando de nomenclaturas cono de visión) no debe de tener occlusiones en ningún momento del barrido. Para ello, se ha seguido un procedimiento en el que mediante simulación CAD y basándonos en los cálculos teóricos descritos en el apartado 3 se automatiza el proceso de diseño en base a los modelos 3D de las carrocerías, incluyendo todos los elementos estructurales del tunel. En concreto se tiene implementado en la plataforma CAD/CAM/CAE NX-Siemens el túnel parametrizado en “KnowledgeFusion” que ha permitido utilizar diversos procesos de optimización basados en algoritmos genéticos para la obtención de soluciones válidas.

En la Figura 7, se muestra el túnel de inspección diseñado en sus diferentes vistas: alzado, perfil, planta y perspectiva isométrica. En ellas se observan los subsistemas de visión, de iluminación y la estructura de sustentación, así como diversos elementos electromecánicos. La estructura porticada del subsistema de iluminación dispone de once arcos de iluminación que envuelven el vehículo generando un barrido uniforme de luz. Cada arco está formado por siete tubos de iluminación: un tubo en posición horizontal superior, tubos en posición oblicua superior izquierda y derecha, tubos en posición vertical izquierda y derecha y tubos en posición oblicua inferior izquierda y derecha.

En las Figuras 8(a) y 8(b) se muestran los prismas de visión de las cámaras superiores (horizontales) que cubren el capó (1), el techo (2 y 3) y el maletero (4) del vehículo a inspeccionar,

mientras que las cámaras laterales cubren las aletas frontales (5 y 9), las puertas (6, 7, 10 y 11) y las aletas traseras (8 y 12) a ambos lados.

El túnel de inspección está formado por diversos elementos electromecánicos que posicionan el objeto dentro del túnel con lanzaderas y posicionadores a fin de garantizar la inspección de forma adecuada. Para cada vehículo a inspeccionar la secuencia de movimientos, según se muestra en la Figura 9, consta de los siguientes pasos: 1) el vehículo es introducido en el túnel y detenido mediante posicionadores; 2) el subsistema de iluminación realiza un barrido hacia delante o hacia atrás -indistintamente- dependiendo de la posición en la que se hubiera quedado por la inspección anterior; y 3) el vehículo es liberado y expulsado del túnel.

#### 4.2. Procesamiento de Imágenes

Se ha desarrollado una metodología de procesamiento de imágenes con las siguientes fases: 1) adquisición de imágenes; 2) fusión de imágenes; 3) ajuste o *matching* de la imagen con respecto a una imagen de referencia; 4) uniformado o *blurring* de los diferentes niveles de iluminación de los tubos; 5) binarización de la imagen a partir de un umbralizado local a nivel de píxel; 6) detección de regiones y clasificación de defectos.

Durante el barrido de iluminación se adquieren un conjunto de imágenes que garantizan la plena iluminación del objeto a inspeccionar, véase la Figura 10(a). El número de imágenes  $M = 150$  a adquirir, depende de la longitud del barrido de iluminación  $L = 0,745m$ , la velocidad de barrido  $v_{light} = 0,0745m/s$  y la máxima frecuencia de adquisición de imágenes por parte de las cámaras  $fps = 15Hz$ :

$$M \geq \left\lceil \frac{L}{v_{light}} \cdot fps \right\rceil \quad (20)$$

A partir de superposición de todas las  $M$  imágenes adquiridas  $\{\mathcal{I}_i\}$  se obtiene la imagen fusionada  $\mathcal{I}_m$ , véase la Figura 10(b). La superposición se obtiene a partir de aplicar, píxel a píxel, la operación máximo en escala de grises de las imágenes adquiridas durante el barrido de iluminación Leon and Kammel (2006).

$$\mathcal{I}_m(i, j) = \max \{\mathcal{I}_1(i, j), \mathcal{I}_2(i, j), \dots, \mathcal{I}_M(i, j)\} \quad (21)$$

La imagen fusionada es ajustada mediante técnicas de *matching* de patrones con respecto a una imagen modelo, a fin de compensar pequeñas variaciones en el posicionamiento de la carrocería. Este ajuste es necesario pues el resto de cálculos requieren operaciones precisas a nivel de píxel. La Figura 10(c) muestra, para el capó del Ford Focus 5P, los patrones de búsqueda utilizados, en los que el recuadro rojo es la zona a buscar y el recuadro verde es la zona de búsqueda. Sea  $\mathcal{Z}' = \{\mathbf{z}'_1, \mathbf{z}'_2, \dots, \mathbf{z}'_{n'}\} = \{(x'_1, y'_1), (x'_2, y'_2), \dots, (x'_{n'}, y'_{n'})\}$  el conjunto, de tamaño  $n' = \dim(\mathcal{Z}')$ , de píxeles que definen el centro de los patrones en la imagen de referencia y sea  $\mathcal{Z} = \{\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_n\} = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$  el conjunto de píxeles de los centros encontrados en la imagen  $\mathcal{I}_m$ , siendo  $n = \dim(\mathcal{Z})$ , la correspondencia entre los conjuntos  $\mathbf{z}_i \leftrightarrow \mathbf{z}'_j$  se establece a partir de

la técnica del vecino más próximo, obteniendo la lista  $\mathcal{H}$  de correspondencias tal que  $j = \mathcal{H}(i)$ . La imagen resultante  $\mathcal{I}_r$ , es resultante tras aplicar una rotación  $\theta$  y una traslación  $\mathbf{t} = [t_x, t_y]^T$  a la imagen  $\mathcal{I}_m$  es Lu and Milios (1994) utilizando una aproximación bilineal para cada píxel:

$$\mathcal{I}_r(i, j) = \mathbf{R}(-\theta) \cdot \mathcal{I}_m(i, j) + \mathbf{t} \quad (22)$$

siendo  $\theta = \arctan\left(\frac{\sigma_{xy}^2 - \sigma_{x'y'}^2}{\sigma_{xx'}^2 - \sigma_{yy'}^2}\right)$  y  $\mathbf{t} = \begin{bmatrix} \bar{x}' \\ \bar{y}' \end{bmatrix} - \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix}$  y  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{x}'$  y  $\bar{y}'$  las medias de los puntos para cada conjunto y  $\sigma_{xx'}^2, \sigma_{yy'}^2, \sigma_{xy}^2$  y  $\sigma_{x'y'}^2$  sus covarianzas y  $\mathbf{R}(\theta)$  una matriz de rotación.

Después del *matching*, se aplica un proceso de uniformado, cuya finalidad es obtener una imagen homogénea frente a los cambios de iluminación de los tubos, como se describe a continuación. En las imágenes 10(b) y 10(c) se puede apreciar que, como consecuencia de los diferentes niveles de desgaste de los tubos de iluminación, aparecen franjas ha desaparecido en la imagen uniformada 10(d). Para ello se aplican operaciones de máximos y mínimos en la dirección del barido de iluminación. Además, se han extraído todos aquellos píxeles que estén por debajo de un cierto umbral, candidatos a ser defectos.

Seguidamente, se aplica un proceso de umbralizado que genera una imagen binaria. Este proceso se realiza a nivel de pixel de forma local, es decir, cada pixel, dispone de un nivel de umbralizado distinto en función de la zona de inspección. La Figura 10(e) muestra una imagen ejemplo umbralizado local correspondiente para el capó de un coche. Como se observa, los niveles de umbralizado son distintos de unos pixeles a otros. Esta imagen umbral se obtiene como un proceso de auto-ajuste en base a una media móvil de las  $N$  últimas carrocerías de ese mismo modelo y color, esto es,  $\mathcal{I}_{u,t} = (N-1)/N\mathcal{I}_{u,t-1} + \mathcal{I}_{b,t}/N$ , siendo  $\mathcal{I}_{u,t}$  y  $\mathcal{I}_{u,t-1}$  la imagen de umbralizado actual y anterior, respectivamente y  $\mathcal{I}_b$  la imagen uniformada como consecuencia del proceso anterior. El objetivo de esta media móvil es, fundamentalmente, filtrar la detección de detectos como consecuencia del efecto de piel de naranja que aparece en la zonas en las que se acumula pintura y que no se considera un defecto de pintado en sí mismo ya que no puede ser subsanado en la zona de reparación y pulido.

Tras el proceso de umbralizado, los defectos pueden aparecer como un píxel en blanco en la imagen binarizada o una agrupación de píxeles. Se requiere por tanto, de la implementación de un algoritmo de detección de regiones o manchas. Así mismo, se aplica una máscara o ventana en la que determinados píxeles quedan excluidos de este procesamiento, pues se consideran zonas en las que se tiende a obtener falsos positivos como consecuencia de bordes y pliegues de la chapa o sencillamente no son de interés. La Figura 10(g) muestra los defectos encontrados.

Los defectos se clasifican en función de su tamaño, mediante una codificación en colores, siendo el rojo el color usado para los defectos más pequeños, verde intermedios y azul para los más grandes. En este proceso se utiliza la imagen de resolución en  $mm/px$  de la Figura 10(f), mientras que la Figura 10(g) muestra una imagen con la clasificación obtenida, habiéndose aplicado previamente la máscara. En la Figura 10(h) se muestra

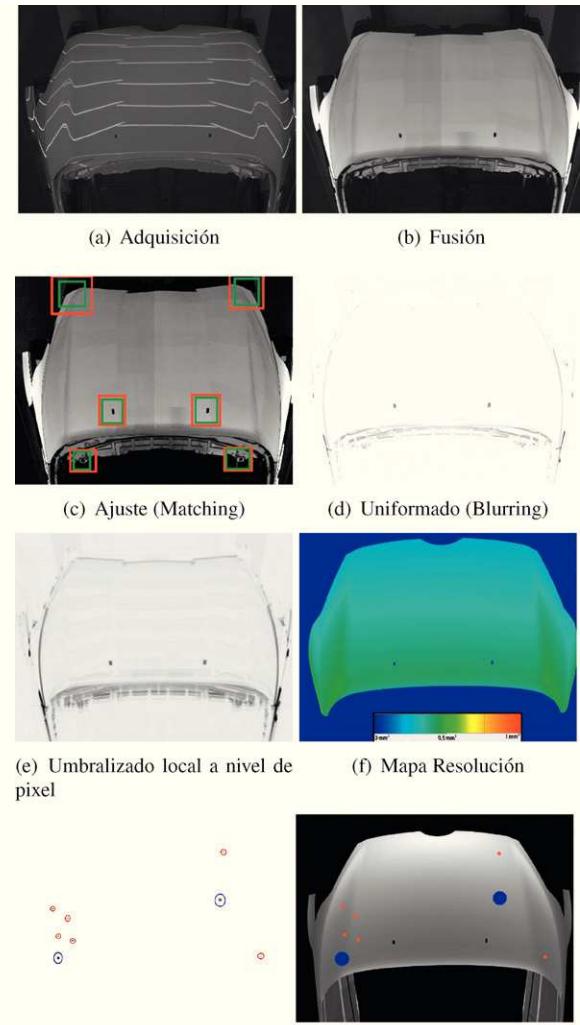


Figura 10: Imágenes asociadas al procesamiento del Ford Focus 5P.

la imagen que los operarios observan para localizar y reparar los defectos.

Finalmente, en la Figura 11 se muestra una imagen con los diferentes mapas de resolución aplicados para cada zona de la carrocería para los niveles de resolución admisibles, siguiendo la misma codificación que en la Figura 10(f).

## 5. Resultados

### 5.1. Detección de defectos

Los defectos de pintado son muy variados: unos pueden influir únicamente en el aspecto visual de la capa de pintura y no suponer defectos apreciables en la calidad de la misma (variación de color, descolgados, etc.) y otros por el contrario repercuten en las funciones y propiedades de la carrocería, conduciendo a un deterioro importante del sistema o del propio soporte, si no se eliminan (cráteres, poros, desconchados, etc.).

La Figura 12 muestra los numerosos defectos encontrados con la metodología de procesamiento planteada, en la que el color rojo implica defectos de menor tamaño, el verde de un tamaño intermedio y el azul es para defectos de tamaño mucho más grande. No es objeto de este artículo analizar la tasa

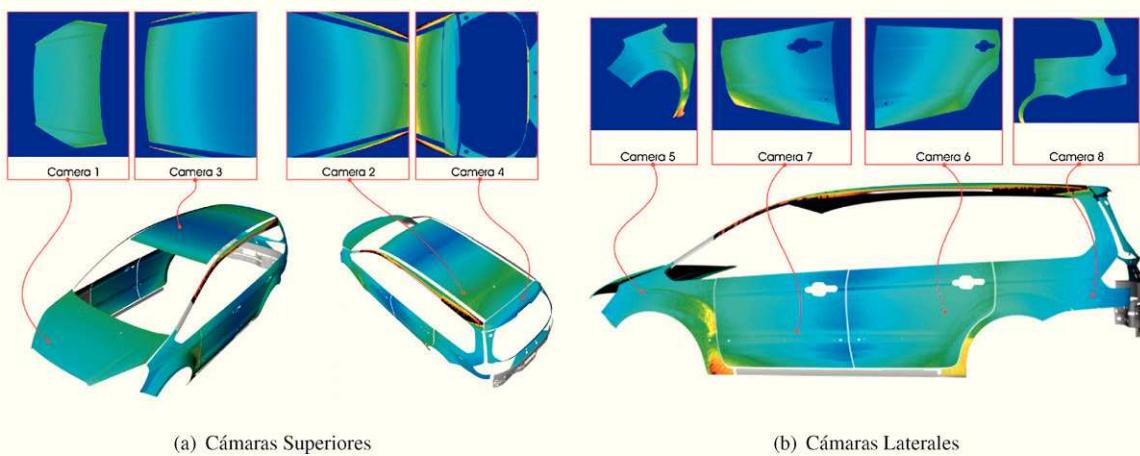


Figura 11: Mapas de resolución de una carrocería completa.

de fiabilidad del proceso de detección. Más bien, se pretende mostrar la capacidad de obtener defectos a partir de un conjunto de paneles con diferentes tipos de defectos. Los defectos más comunes son:

- Piel de naranja:** Una superficie pintada tiene piel de naranja cuando su aspecto irregular se asemeja al de una piel de cáscara de naranja, Figura 12(a). En realidad, se trata de falta de extensibilidad de la pintura que puede estar motivada por diversos factores.
  - Marcas de dedos, ropa, tubos/mangueras, bolsas:** Aparecen como consecuencia de tocar la pintura en estado *fresco* o rozar la pintura con diversos objetos tales como la ropa, mangueras, bolsas, etc., Figuras 12(b), 12(c), 12(d) y 12(e).
  - Exceso o defecto de disolvente, cera o sellado:** Aparecen por la incorrecta aplicación de disolvente o por el exceso de disolvente, de la cera o del sellado, Figuras 12(f), 12(g), 12(i), 12(k), 12(l). Los defectos como consecuencia del disolvente se denominan también burbujas de ebullición, los hervidos se producen cuando una película de pintura ha secado superficialmente, pero sin hacerlo en profundidad, por oclusión de disolventes, que al evaporarse atraviesan la película de pintura ya seca rompiéndola y dando lugar a la aparición de microporos y ampollas. Cuando se lija aparece un espacio hueco de mayor superficie, debajo del cual se puede ver a menudo la capa de fondo.
  - Cráteres:** Los cráteres consisten en la formación de unas depresiones o cavidades circulares semejantes a cráteres, que se encuentran en la capa de acabado o en las capas intermedias y cuyos bordes sobresalen ligeramente, Figura 12(h).
  - Burbujas y ampollas:** Son protuberancias huecas, producidas por oclusión de aire dentro de la película; debido a un rápido secado, se cierra la superficie lo que no permite la salida de aire o gases de reacción que quedan atrapados en la burbuja. Disminuyendo la adherencia y la función de protección. Las ampollas son casi siempre

elevaciones circulares y uniformes, cuya ubicación y frecuencia es muy diversa. Estas ampollas se pueden formar tanto entre las diferentes capas del sistema de pintura como por debajo del mismo, es decir, entre la chapa y la pintura, Figura 12(j).

6. **Cuarteados:** La forma en que se manifiesta este defecto consiste en la aparición de un determinado número de grietas de diferente longitud y anchura, en todas las direcciones, que se hacen visibles en la película de pintura.
  7. **Suciedad y polvo:** Este defecto se produce por las inclusiones de suciedad, cuerpos extraños y polvo con desigualdades pequeñas y granuladas, existentes casi siempre en gran cantidad y repartidas con mayor o menor regularidad, que sobresalen de la pintura.

Con la presente técnica de detección, además de detectarse microdefectos en superficies especulares, se detectan macrodefectos de todo tipo: algunos generados en los procesos de conformado de la chapa y otros como consecuencia de suciedades adheridas o imperfecciones superficiales. En base a la tipología de defectos anterior, se ha procedido a validar la capacidad de detección de defectos en unas placas de prueba.

En este punto, podría incluso establecerse un proceso de clasificación más sofisticado atendiendo a la tipología de defectos encontrados pudiéndose además considerarse aspectos tales como la dispersión, forma, etc.

### *5.2. Implantación en la factoría Ford de Almussafes*

El primer problema para la implantación del tunel real en la zona de pinturas de Ford España S.A. era el cumplimiento de los tiempos de ciclo. El vehículo debía de ser inspeccionado en 20 segundos, incluyendo la entrada y salida del vehículo del tunel. En el tunel de inspección propuesto, 5 segundos se consumen en el posicionamiento y otros 5 segundos mas en la salida del vehículo, quedando 10 segundos para el barrido y la fusión de imágenes. El procesamiento de las imágenes fusionadas se realizan mientras sale el coche inspeccionado y entra el siguiente. El procesado cumple con estas especificaciones siendo el primero capaz de realizar tales tarea bajo estas estrictas exigencias.

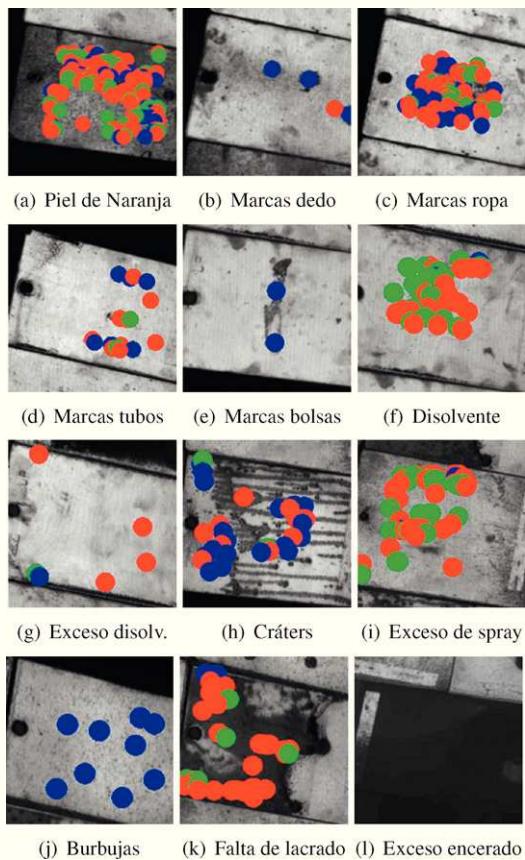


Figura 12: Taxonomía de defectos.

Además, una vez implantado el tunel en la factoría FORD de Almussafes, el departamento de calidad de Ford España S.A. ha realizado un estudio de las mejoras introducidas por el sistema de detección. Por un lado, se ha estudiado el porcentaje de fallos del sistema para las zonas del capó y techo. El procedimiento consiste en el muestreo aleatorio de vehículos que circulan por la línea de producción y que han sido inspeccionados y reparados en su caso. Los vehículos seleccionados son sacados de la línea de producción y examinados detenidamente por el personal departamento de calidad. El periodo del estudio comprende los meses desde Agosto 2008 hasta Julio 2009, primer año de funcionamiento del sistema. La Figura 13(a) muestra los resultados obtenidos en los que claramente se aprecia un descenso de los defectos no detectado por los operarios en línea. Concretamente, la media de defectos no detectados correctamente antes de introducción del sistema era de 35,5%, mientras que tras la introducir el sistema de inspección la tasa bajó al 2,6%, obteniendo una mejora de un 92,6%.

Por otro lado, el estudio toma en consideración las reclamaciones tras la venta con motivo de defectos de pintura encontrados en la zona del capó y del techo en MYTD (media anual por millar). En este caso, los datos abarcan el periodo Agosto 2007 a Julio 2008 (MYTD en 2008) y el periodo Agosto 2008 a Julio 2009 (MYTD en 2009), que son los indicadores que habitualmente maneja el departamento de calidad de la empresa. Se observa en la Figura 13(b) el porcentaje de reclamaciones por

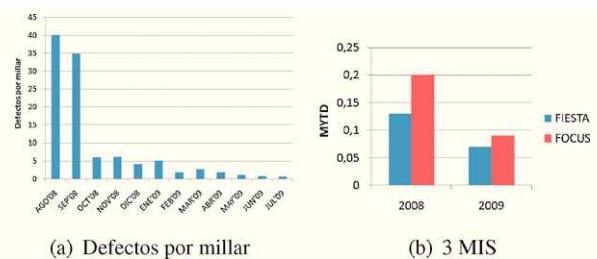


Figura 13: Número de defectos por millar no detectados, medidas a la salida de la factoría y Media anual de reclamaciones post-venta por millar durante los primeros 3 meses en servicio (MIS).

miles en los periodos anteriormente descritos para el modelo Fiesta y el Focus 5P. De los datos facilitados, se puede afirmar que el sistema ha introducido entorno a un 46,15 % de mejora para el caso del Fiesta frente a un 55 % en el Focus.

Indicar que estos datos están afectados por la limitación que tienen los operarios de reparar todos los defectos detectados por el sistema de inspección. Esta saturación de los operarios nos lleva a entender que la eficacia del sistema puede ser incluso superior a los reflejados en las Figuras 13(a) y 13(b).

## 6. Conclusión

En este artículo se ha descrito el diseño y la implementación de un novedoso sistema de inspección basado en visión artificial para detectar defectos en carrocerías de vehículos automóviles. El sistema implantado en la factoría FORD de Almussafes (Valencia) es fruto de la investigación durante casi una década, financiada tanto por la misma Ford España como por varios programas de investigación.

La principal innovación reside en que se trata de un sistema completamente automatizado que detecta y monitoriza alrededor del 100 % de los defectos que se observan mediante inspección humana, de una manera sistemática y dentro de tiempo de ciclo impuesto por la línea de producción de la Factoría. Véanse los vídeos en IDF (2009) como demostración del sistema en funcionamiento. En la actualidad el sistema está rediseñándose para su implantación en otras factorías Ford a nivel mundial con modelos de vehículos distintos.

Aunque este no es un objetivo primordial de la industria automovilística, se ha evaluado, que la mejora introducida en la detección de los defectos implica aumentar en un 20 % la vida útil de la chapa, que en el caso de un vehículo se pasaría de 8,5 hasta 10 años. No obstante, dado que la aplicabilidad de los resultados obtenidos se puede extender a otro tipo de productos tales como electrodomésticos, carrocerías de trenes, cascos de barco, elementos estructurales en aviones, etc., la mejora de la vida útil de la chapa es algo interesante a tener en cuenta.

El sistema se basa en el principio de detección de defectos mediante la generación de un barrido de iluminación, con el sistema de visión y el vehículo a inspeccionar estáticos. Tras la adquisición de las imágenes durante el barrido de iluminación, se realiza un procesamiento que permite detectar defecto de hasta 0.2mm de diámetro. La clave reside en el denominado efecto de amplificación que amplifica los defectos en las transiciones generadas por el barrido de iluminación.

Se ha desarrollado una metodología para túneles de inspección en la que es posible diseñar sistemas totalmente adaptados al tipo de objeto a inspeccionar combinando conjuntamente, y sin occlusiones, subsistemas de visión con subsistemas de iluminación móviles. En paralelo, se ha desarrollado un procesamiento de imágenes específico para detectar microdefectos que cubre desde las fases de adquisición de imágenes hasta la detección y clasificación de los defectos.

Además, este túnel de inspección se postula como un potente instrumento para conseguir también una mejora continua del proceso de fabricación, en general, y de pintado, en particular. La implementación de sistemas de detección de defectos tiene una evidente importancia estratégica a nivel industrial, pero también a nivel social al satisfacer demandas crecientes de calidad por parte de los consumidores, reducción de costes y mejora de la imagen de marca, así como sistemática y simplicidad en el trabajo por parte de los operarios.

En este sentido, el túnel de inspección evita la fatiga ocular de los trabajadores, sometidos antes a un alto nivel de luminosidad y con tiempo limitado para inspeccionar cada elemento. Con la automatización del proceso de detección se consigue una gran sistemática, además de mayores cotas de fiabilidad.

## English Summary

### Defect Detection System for Car Bodies based on Artificial Vision: Design and Implementation

#### Abstract

This paper describes the design and implementation of a novel inspection system for detecting defects on car bodies based on artificial vision, implemented in Ford Factory at Almussafes (Spain). The system is based on the principle of performing a lightning sweeping with static imaging system, which causes shadows surrounding defects when merging consecutive images, coined as defect augmentation phenomena. As a result, we can detect millimetric defects of 0.2mm diameter or greater with different shapes which were very hard to detect with existing technology without that phenomena. The project has generated two PTC patents, the first one protects the defect augmentation phenomena, while the second protects the industrial system itself. The main innovation of this industrial project is the development of a system that improves in almost 100As a consequences, it reduces the number of invalid vehicles, energy consumption, saving painting which also implies a significant cost reduction. It also improves working conditions for workers by reducing ocular fatigues.

**Keywords:** Automobile, Quality Control, defect detection

#### Agradecimientos

Esta investigación, financiada por Ford-España, ha contado con las siguientes subvenciones públicas: Programa Nacional de Fomento de la Investigación Técnica (PROFIT), Sector Automoción, Ref. FIT-110200-2001-30 y FIT-110200-2003-33, (2001 y 2003) y PROGRAMA NOEMI-GESTA. La solución industrial quedó Finalista con Mención de Honor en los 7º Premios a las "Mejores Innovaciones Tecnológicas en Automoción Salón Inter. del Automóvil" (Barcelona, 2009).

#### Referencias

Alders, K., M. Lehe and G. Wan (2000). Method for the automatic recognition of surface defects in body shells and device for carrying out said method. Patent PCT/EP98/04291 Audi AG.

- Aluze, Denis, Fred Merienne, Christophe Dumont and Patrick Gorria (2002). Vision system for defect imaging, detection, and characterization on a specular surface of a 3d object. *Image and Vision Computing* **20**(8), 569 – 580.
- Azorín López, Jorge (2007). Modelado de sistemas para visión de objetos especulares: inspección visual automática en producción industrial. PhD thesis. Universidad de Alicante. Departamento de Tecnología Informática y Computación.
- Balzer, Jonathan, Sebastian Höfer and Jürgen Beyerer (2011). Multiview specular stereo reconstruction of large mirror surfaces. In: *CVPR*. pp. 2537–2544.
- Clarke, D.A. (1990). Panel surface flaw inspection. Patent US4920385 Diffraction Ltd.
- IDF (2009). Video ford. [http://idf.webs.upv.es/descargas/quality\\_control\\_based\\_on\\_artificial\\_vision.mpg](http://idf.webs.upv.es/descargas/quality_control_based_on_artificial_vision.mpg) y [http://idf.webs.upv.es/descargas/ford\\_spanish.mpg](http://idf.webs.upv.es/descargas/ford_spanish.mpg).
- Imanishi, M., K. Yoshida, T. Asaeda, Y. Suzuki S. Chida and M. Watanabe (1998). Surface defect inspection apparatus. Patent US5726705 Nissan Motor, CO.
- Kammel, S. and F. Puente Leon (2003). Head-mounted display for interactive inspection of painted free-form surfaces. In: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series* (C. E. Rash & C. E. Reese, Ed.). Vol. 5079 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. pp. 254–264.
- Kammel, S. and F. Puente Leon (2005a). Deflectometric measurement of specular surfaces. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference*. pp. 531–536.
- Kammel, S. and F.P. Leon (2005b). Deflectometric measurement of specular surfaces. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005. IMTC 2005. Proceedings of the IEEE*. Vol. 1. pp. 531 –536.
- Kammel, Soeren (2002). Automated optimization of measurement setups for the inspection of specular surfaces. Vol. 4567. SPIE. pp. 199–206.
- Kuhlmann, L. (1995). On automatic visual inspection of reflective surfaces. PhD thesis. University of Denmark.
- Leon, F. Puente and S. Kammel (2003). Image fusion techniques for robust inspection of specular surfaces. In: *Multisensor, Multisource Information Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications*. Vol. 5099. pp. 77–86.
- Leon, F. Puente and S. Kammel (2006). Inspection of specular and painted surfaces with centralized fusion techniques. *Measurement* **39**(6), 536 – 546.
- Li, J., J.M. Parker and Z. Hou (2005). An intelligent system for real time automatic defect inspection on specular coated surfaces. In: *Proc. SPIE Visual Communications and Image Processing*.
- Li, Jinhua (2006). A, Intelligent System for Defect Inspection of Specular Painted Ceramic Tiles. PhD thesis. University of Kentucky.
- Lu, Feng and Evangelos Milios (1994). Robot pose estimation in unknown environments by matching 2d range scans. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* **18**, 249–275.
- Martinez, Silvia Satorres, Juan Gomez Ortega, Javier Gamez Garcia and Alejandro Sanchez Garcia (2010). A machine vision for automated headlamp lens inspection. In: *Vision Sensors and Edge Detection*. pp. 63–80. InTech.
- Perard, Denis and Juergen Beyerer (1997). Three-dimensional measurement of specular free-form surfaces with a structured-lighting reflection technique. Vol. 3204. SPIE. pp. 74–80.
- Pernkopf, Franz and Paul O'Leary (2003). Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces. *NDT&E International* **36**, 609 – 617.
- Prior, Miguel A., Jose Simon, Alvaro Herraez, Jose M. Asensio, Josep Tornero, Ana V. Ruescas and Leopoldo Armesto (2010). Inspection system and method of defect detection on specular surfaces. PCT/IB2010/052193 Ford España, S.A.
- Seulin, R., F. Merienne and P. Gorria (2001). Dynamic lighting system for specular surface inspection. In: *Proc. Of SPIE*. pp. 199–206.
- Seulin, R., F. Merienne and P. Gorria (n.d.). Machine vision system for specular surface inspection: Use of simulation process as a tool for design and optimization.
- Seulin, R., N. Bonnot, F. Merienne and P. Gorria (2002a). Simulation process for the design and optimization of a machine vision system for specular surface inspection. In: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series* (K. G. Harding & J. W. Miller, Ed.). Vol. 4567 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. pp. 129–140.
- Seulin, Ralph, Frederic Merienne and Patrick Gorria (2002b). Simulation of specular surface imaging based on computer graphics: application on a vision inspection system. *EURASIP J. Appl. Signal Process.* **2002**, 649–658.