



Guiado de robots industriales con visión artificial.

Robotización de un proceso de fabricación de radiadores

*Industrial robot guidance using computer vision.
Robotization of a radiator manufacturing process*

• Eusebio de la Fuente-López Doctor Ingeniero Industrial ETS. Ingenieros Industriales-Universidad de Valladolid
• Félix Miguel Trespaderne Doctor Ingeniero Industrial ETS Ingenieros Industriales-Universidad de Valladolid

Recibido: 13/01/09 • Aceptado: 20/04/09

ABSTRACT

- In some manufacturing processes, products with different shapes and sizes are manufactured and these products are often presented at the manipulation sites by means of systems that do not control their position or orientation. The automatic manipulation in these processes has traditionally been very intricate and expensive. Nevertheless, the performance of the new sensors, such as computer vision, and their easy integration with robots have made the automation really accessible.
- In an effort to contribute in the field of guided vision robot to gain higher flexibility and adaptability in industrial robots applications, this paper presents our work towards the automation of a sealing process in a radiator manufacturing line, where many different sizes and models must be processed both simultaneously and in movement. The robot guidance problem is solved using two vision systems that determine accurately the position of the pieces. A fixed vision system acquires a global image of the approaching radiators and computes a first pose estimation. This estimation is used for the robot to approach to the part and a second system mounted on the robot arm, acquires a closer image to determine precisely the position and orientation just before the manipulation is performed.
- The developed system is working nowadays in an industrial line making it possible to robotize a complex task.
- **Keywords:** Computer vision, Robot vision, Pattern recognition, Industrial Robots.

RESUMEN

En algunos procesos de fabricación se producen simultáneamente artículos que presentan diferente forma y tamaño y, además, son transportados mediante sistemas que no controlan su posición ni orientación. La manipulación automática en estos procesos ha sido tradicionalmente muy complicada y enormemente costosa. Sin embargo, gracias a las prestaciones de los nuevos sensores, tales como los sistemas de visión artificial, y a su facilidad para ser integrados en los robots, la automatización se ha vuelto mucho más accesible.

En este artículo se presenta un sistema de visión para el guiado de un robot que opera en una industria del sector del metal. Este sistema permite trabajar al robot sin detener el producto, sobre piezas de tamaños muy diferentes y que llegan mezcladas al punto de manipulación. Para ello, el robot emplea dos equipos de visión para poder hacer frente a estas variables, un equipo fijo y otro montado sobre el brazo del manipulador. El sistema fijo adquiere una imagen global de los productos que se acercan al punto de manipulación y hace una estimación de la posición de éstos. Esta estimación es usada por el robot para acercarse al producto y adquirir una nueva imagen que le permite determinar con precisión la posición y orientación en el espacio del producto justo antes de la manipulación.

El sistema desarrollado está implantado en una línea de producción y ha permitido, sin hacer modificaciones sobre la línea, robotizar una tarea cuya automatización hasta hace poco resultaba inabordable.

Palabras clave: Visión Artificial, Guiado de Robots de Producción, Reconocimiento de Patrones.

1. INTRODUCCIÓN

Las necesidades de fabricación actuales precisan cada vez más del empleo de sistemas de manipulación flexibles. Muchos procesos deben trabajar sobre artículos en movimiento, sobre piezas que muestran diferencias significativas entre ellas o que llegan mezcladas al punto de manipulación. En estas situaciones, donde los productos presentan un alto grado de variabilidad o se transportan mediante sistemas que no controlan ni su posición ni su orientación, los robots tradicionales no son aplicables directamente. Sin embargo, la fuerte presión que sufren las industrias para bajar los costes de producción y las crecientes demandas de precisión y calidad hacen necesaria la robotización de estos procesos y para ello se hace imprescindible dotar a los robots de capacidades sensoriales externas e integrarlas con la manipulación robótica.

Entre el amplio abanico de sensores posibles, las cámaras de vídeo se han consolidado como una de las opciones más adecuadas por su capacidad de adquirir gran cantidad de información rápidamente, con bajo coste y alta fiabilidad. Haciendo uso de una o varias cámaras conectadas a un computador, los sistemas de visión artificial permiten establecer inmediatamente la posición y orientación de las piezas que aparecen dentro del campo de visión del sensor. Las coordenadas halladas de la pieza se comunican al controlador de movimiento del robot para que éste reoriente su brazo, de forma que la garra o herramienta se posicione con precisión sobre ella. De esta forma, la incorporación de la visión artificial permite extender enormemente el campo de aplicación tradicional de los robots: operaciones de descarga de contenedores con productos en posición aleatoria, aprehensión de artículos sobre cintas en movimiento, manipulación de productos colgados de ganchos en cadenas transportadoras, etc.

El desarrollo de un sistema industrial de visión 3D para el guiado de un robot de producción puede no resultar algo muy novedoso. Desde hace más de dos décadas, desde los centros de investigación se ha venido prediciendo la aparición de tales sistemas. Desafortunadamente, esta euforia sobre las posibilidades de los robots guiados ha tenido que dejar paso durante muchos años a la dura realidad. Los sistemas 3D desarrollados en los laboratorios no se han exportado bien al mundo real de las aplicaciones industriales. Las oclusiones parciales en los objetos a reconocer, las condiciones variables en la iluminación y la hostilidad de los entornos de producción han hecho fracasar a estos equipos, que además debían ejecutarse en máquinas con una potencia computacional limitada para abordar la detección de patrones en escenas complejas.

Aunque durante estos últimos años han sido relativamente comunes los sistemas para el guiado de robots con visión 2D, hay muy pocas aplicaciones de guiado tridimensional para manipulación de objetos en movimiento que se hayan materializado en una planta industrial. Sólo algunas industrias norteamericanas y del norte de Europa del sector del automóvil están introduciendo sistemas de este tipo en algunas aplicaciones pioneras (Calvo, 2005).

Dentro de este marco de investigación encaminado a incrementar la flexibilidad de los robots industriales mediante la integración de sistemas de visión, se presentará a continuación un sistema de visión 3D desarrollado para la robotización de un proceso de sellado en una línea de pintura de radiadores de calefacción. La automatización es especialmente difícil en este caso debido a la gran variabilidad de tamaños que se fabrican y también a que el producto se encuentra en movimiento colgado de ganchos.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO A ROBOTIZAR

La fabricación de radiadores de aluminio para calefacción comienza con la fusión de lingotes de una aleación de aluminio y la inyección de ésta en moldes para obtener los módulos o elementos individuales de distintas longitudes. Una vez roscados los orificios de entrada/salida, cada radiador se forma ensamblando un número determinado de elementos idénticos. El número de elementos a montar, y por tanto, la anchura del radiador, también depende de las demandas de los clientes (ver fig. 1).

Los radiadores montados se cuelgan de los ganchos de una cadena transportadora para imprimirlos en un baño por anaforesis. Como es prioritario maximizar el flujo de material en los baños, diferentes tamaños se entremezclan con el único objetivo de introducir la máxima cantidad de material. Tras el proceso de anaforesis, los radiadores se secan haciéndolos pasar por un horno y se sellan sus entradas y salidas con etiquetas autoadhesivas. El acabado final se logra mediante la aplicación de una pintura epoxi en polvo y su posterior secado en otro horno a 200° C.

El sellado de las entradas y salidas de los radiadores con etiquetas autoadhesivas, previo a la aplicación de pintura epoxi, es necesario para evitar que la pintura en polvo penetre y se deposite sobre la corona de las entradas/salidas y su roscado interno. La deposición de pintura en esta zona es especialmente problemática puesto que dificulta el montaje de válvulas y tapones, comprometiendo la estanqueidad posterior de la rosca y originando fugas de agua cuando el radiador es montado en una instalación de calefacción doméstica. Es precisamente este proceso de sellado con etiquetas autoadhesivas el que se ha automatizado empleando un robot guiado por visión artificial.

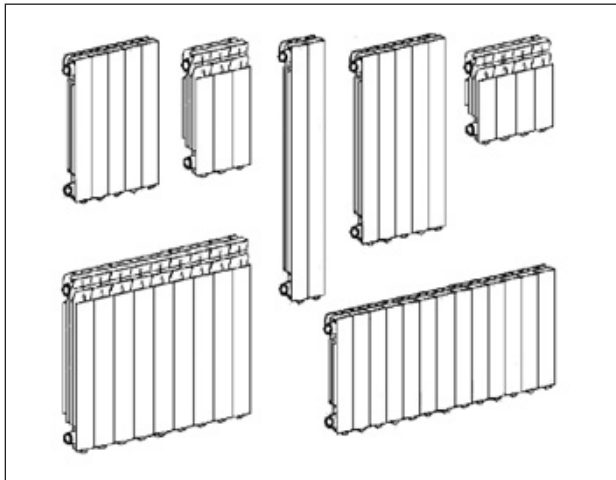


Fig. 1. En la línea de fabricación se entremezclan distintos tamaños de radiadores

La mezcla de distintos tamaños, si bien mejora el rendimiento de la línea de anafóresis, genera un grave problema a la hora de automatizar el sellado de las entradas y salidas de los radiadores empleando etiquetas autoadhesivas. En estas circunstancias, no es aplicable ningún sistema tradicional de manipulación automática ya que no existe ningún conocimiento a priori ni del tamaño del producto que se va a manipular, ni de su posición, ya que los radiadores se encuentran en movimiento. Este es el motivo por el que el simple y repetitivo proceso de adhesión de etiquetas ha sido llevado a cabo hasta hace poco por operadores humanos.

La robotización del proceso requiere de un sistema con capacidad para detectar cada radiador que llega al punto de sellado y calcular la posición exacta de las entradas y salidas de los radiadores, que a partir de ahora denominaremos *moyús* (ver fig.2) siguiendo la nomenclatura empleada por el fabricante. La visión artificial parece la tecnología más adecuada en esta situación dada la gran variabilidad en el tamaño que existe entre los productos a manipular y a que éstos se encuentran en continuo movimiento y expuestos a oscilaciones al ir

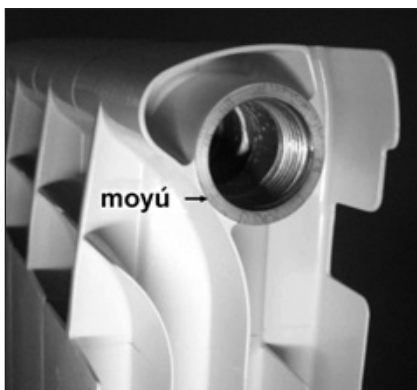


Fig. 2. El robot debe localizar y sellar los cuatro moyús de cada radiador

colgados de ganchos. Para el sellado se dispondrá de un tiempo mínimo de ciclo de 4 segundos por etiqueta, tiempo más que suficiente para ejecutar los algoritmos de procesamiento de imagen. El sellado debe

hacerse en todo caso sin parar la cadena transportadora que conduce los radiadores a una velocidad de unos 3,5 metros por minuto (6 cm/s aprox).

3. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

Debido al enorme tamaño de algunos modelos de radiador de casi un metro cuadrado y al escaso margen de tolerancia para adherir la etiqueta de sellado, del orden de un milímetro, ha sido necesario emplear dos sistemas de visión para acceder con precisión a los puntos de sellado (ver fig.3):

- Un primer **sistema de visión fijo** que adquiere una imagen global de los radiadores que se aproximan al punto de sellado. Este sistema de visión tiene por cometido calcular una primera estimación de la posición de los cuatro moyús de cada radiador. Además, determina si el hueco que existe entre dos radiadores adyacentes en la línea es suficiente para que el robot realice la tarea de sellado. Las coordenadas estimadas serán comunicadas a un robot para que éste se acerque a los radiadores que avanzan colgados de la cadena transportadora sin peligro de colisionar con ellos.
- Un segundo **sistema de visión móvil montado sobre el brazo del robot**, que adquiere una nueva imagen desde una posición mucho más próxima, a la que ha accedido gracias a la estimación del primer sistema. En la imagen captada desde el robot se aprecia con detalle el moyú del radiador que debe sellarse. El análisis de esta imagen ya permite establecer de una manera precisa la posición y orientación de la zona donde debe adherirse la etiqueta de sellado. Las coordenadas calculadas en la imagen son transferidas al controlador del robot para que realice la trayectoria idónea que permita que la etiqueta quede en contacto con el moyú y quede adherida.

En lo que respecta al robot se ha optado por un robot FANUC M710iB/45 articulado de seis grados de libertad, con un alcance suficiente para acceder a los moyús de los diferentes tipos de radiadores que llegan al punto de sellado. El controlador del robot incorpora un hardware opcional del fabricante que realiza el seguimiento continuo de la posición de la cadena transportadora a través de un *encoder*. Este sistema de seguimiento permite tener perfectamente controlada la posición del radiador desde el momento en que se determinan sus coordenadas por el primer sistema de visión, aproximadamente metro y medio antes de llegar a la zona de sellado. Como efecto final, el robot monta una etiquetadora estándar HERMA 400, que automáticamente dispensa las pegatinas de sellado.

A continuación se exponen con más detalle los dos sistemas de visión que se han integrado en la instalación.

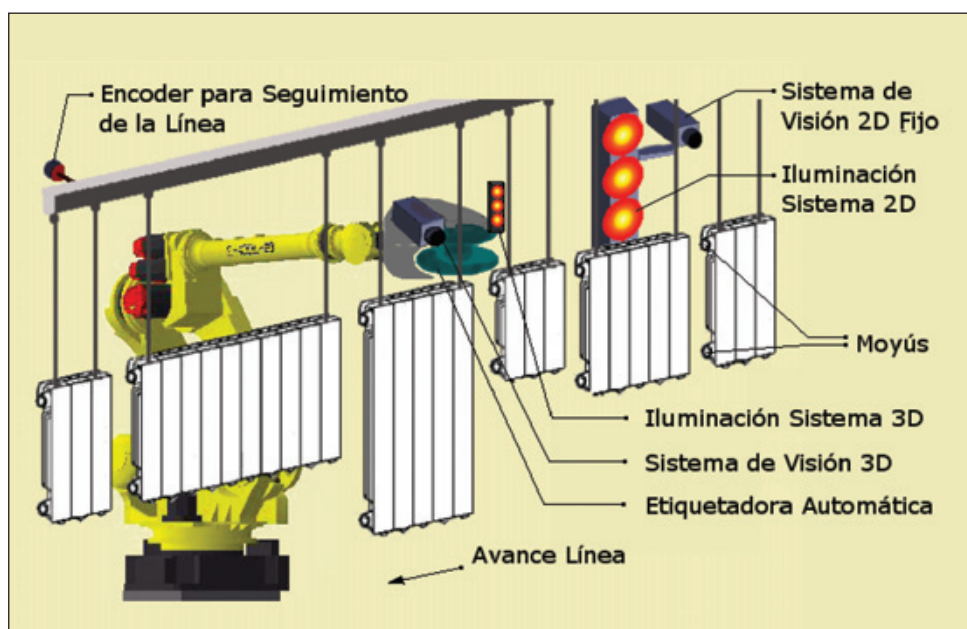


Fig. 3. Esquema de la instalación.

4. SISTEMA FIJO DE VISIÓN 2D

El sistema fijo integra una cámara que se ha instalado con el eje óptico en posición horizontal de forma que su sensor queda paralelo al plano de los radiadores. La cámara se ha ubicado a unos tres metros de la línea para captar una vista general de los radiadores que se acercan al punto de sellado. A esta distancia el sensor dispone de un campo visión suficiente para captar completamente en la imagen la dimensión vertical del radiador de mayor tamaño que puede circular colgado de la cadena transportadora.

Se trata de un sistema de guiado bidimensional o 2D puesto que lo que se pretende es determinar la posición e inclinación de unos productos sobre los que se asume que

siempre estarán en un plano predeterminado, que en este caso es el plano vertical que pasa por la cadena transportadora al ir todos los radiadores colgados de ésta.

En cuanto a la iluminación para este sistema fijo, y dado que no es posible apantallar la escena, se requiere de una fuente con buena potencia lumínica para que las perturbaciones de la luz ambiente sean mínimas. Se ha optado por una iluminación basada en LEDs, ya que éstos presentan unas características muy deseables en un entorno industrial, tal como una

buena esperanza de vida y una intensidad prácticamente constante a lo largo de ella. La luminaria está integrada por una columna de diodos LEDs de alta intensidad con ópticas individuales que focalizan la luz sobre los radiadores.

4.1 ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN DE LOS MOYÚS.

El objetivo del sistema 2D planteado es obtener una primera estimación de dónde pueden encontrarse los moyús de los radiadores que se acercan al punto de manipulación del robot. Para ello, primero determina la posición de cada radiador empleado un algoritmo para detección de rectas.

La detección de rectas es un problema clásico en el procesamiento de imágenes (Forsyth & Ponce, 2003). La gran cantidad de técnicas propuestas en la bibliografía pueden subdividirse *grosso modo* en dos familias: locales y globales. Las primeras necesitan de un algoritmo encadenador de puntos de contorno seguido de un proceso de poligonalización. Estas técnicas, aunque de gran difusión en la bibliografía científica, tienen un limitado uso en aplicaciones industriales como la

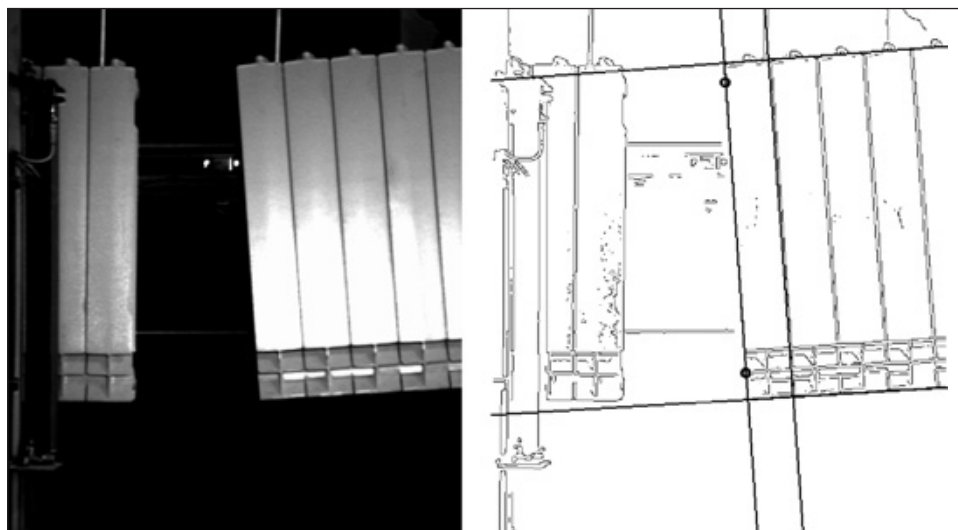


Fig. 4. A) imagen adquirida por el sistema de visión fijo. B) posiciones aproximadas de los dos moyús.

Las técnicas basadas en la transformada de Hough detectan de una forma robusta determinados patrones en la imagen, como rectas, circunferencias, elipses, ... aunque estos patrones aparezcan incompletos o con ruido

presente, ya que presentan problemas de tolerancia a la falta de puntos de contorno debido a la aparición de brillos y por ello discriminan con dificultad segmentos de recta diferentes y próximos entre sí. El enfoque global considera las relaciones globales entre los píxeles de contorno, siendo inmune a los problemas anteriores. Entre estos métodos, los más conocidos son las diferentes variantes basadas en la transformada de **Hough**.

Las técnicas basadas en la transformada de Hough detectan de una forma robusta determinados patrones en la imagen, como rectas, circunferencias, elipses, ... aunque estos patrones aparezcan incompletos o con ruido. La idea básica de la transformada de Hough es la construcción de una tabla de acumulación en un espacio de parámetros. En nuestro caso, estamos interesados en la detección de líneas rectas, que están caracterizadas por dos parámetros, y trabajaremos por tanto sobre un espacio de parámetros bidimensional. Así se transforma un difícil problema de detección de patrones rectilíneos en la imagen, en algo tan sencillo como buscar los picos en una matriz de acumulación. El algoritmo, propuesto por Hough (1962) y generalizado para la detección de todo tipo de formas por Ballard (1981), ha adolecido tradicionalmente de un alto coste computacional. No obstante, gracias al continuo aumento de la potencia de cálculo de los ordenadores, hoy en día la detección de rectas puede implantarse en tiempo real.

En la imagen adquirida por la cámara del sistema 2D, la transformada de **Hough** permite identificar con fiabilidad las rectas correspondientes a los elementos extremos de los radiadores (ver fig.4). Con la obtención de estas rectas, es posible determinar la posición e inclinación del radiador, además de permitir verificar que el hueco existente entre dos radiadores consecutivos es suficiente para posteriormente permitir el acceso al robot. Aunque los moyús no sean visibles en estas imágenes, una vez establecidas estas rectas, sus posiciones se pueden inferir de manera aproximada. La posición de los moyús se establece realizando un desplazamiento predeterminado sobre la recta detectada desde los bordes superior e inferior del radiador.

Si bien la posición del flanco inicial del radiador y su inclinación son estimaciones suficientemente precisas, las

coordenadas de las posiciones de los moyús proporcionadas por este sistema no pueden emplearse directamente para llevar a cabo la adhesión de la etiqueta de sellado. A la distancia a la que se encuentra la cámara fija no es posible establecer las coordenadas del moyú con la precisión requerida y además, con esta vista de tipo frontal en ningún caso se puede estimar la profundidad del moyú h , que es variable según el modelo de radiador (ver fig.5).

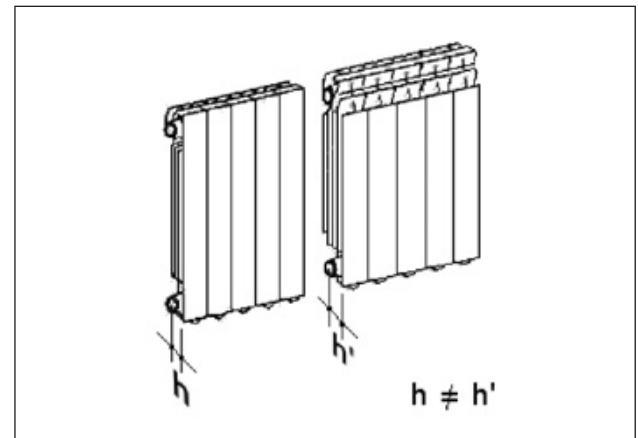


Fig. 5. La profundidad h varía entre modelos.

En estas circunstancias, no sólo hará falta un segundo sistema de visión para alcanzar la precisión requerida sino que, como las posibles posiciones de los centros de los moyús realmente no se restringen a un plano, se hace necesario que este segundo sistema tenga capacidad para evaluar la profundidad h respecto al plano de avance.

5. SISTEMA DE VISION 3D

Para obtener información tridimensional se pueden emplear cámaras de vídeo siguiendo distintas estrategias. No obstante, la técnica más utilizada en el ámbito industrial es la utilización de una única cámara. Los sistemas multicámara son siempre más complejos y delicados, especialmente en el aspecto de la calibración. Los sistemas que trabajan sobre una imagen única operan identificando los patrones geométricos de características clave en la pieza

Cuando se dispone de información geométrica de la pieza a analizar, la utilización de una única cámara suele ser la técnica más simple y barata de obtener información 3D

(rectas, circunferencias, esquinas, taladros,...) y calculan su posición 3D y orientación comparando su proyección en la imagen con el conocimiento a priori de la forma y dimensiones de esas características.

En nuestro caso, la existencia del patrón circular correspondiente a la corona del moyú, permitirá resolver el problema mediante la búsqueda en la imagen de la elipse en que degenerará dicha circunferencia debido a la perspectiva. Si bien la posición relativa y profundidad h de los moyús en el radiador varía ligeramente de unos modelos a otros, en todos los modelos es invariable el tamaño del diámetro externo del moyú. Es precisamente el conocimiento exacto de las dimensiones reales del diámetro externo el que se utilizará para establecer la posición del moyú en el espacio a partir de su proyección en la imagen. Así, la geometría proyectiva establece que la posición y orientación 3D de un círculo de tamaño conocido puede ser calculada a partir de su proyección en la imagen (Kanatani & Liu, 1993).

Es fundamental que en la imagen aparezcan las características geométricas a detectar de la forma más nítida



cámara de nuestro sistema 3D se ha instalado junto a la dispensadora de etiquetas para ser posicionada cerca de cada radiador empleando la información proporcionada por el sistema fijo (ver fig.6). De esta forma, aunque entre los radiadores colgados de la cadena transportadora haya un hueco mínimo, la cámara siempre dispone de una buena vista al ser desplazada por el robot a una posición desde la cual los moyús son vistos completamente.

Para obtener una buena imagen no sólo es preciso posicionar la cámara correctamente, sino también que la escena disponga de una iluminación que realce al máximo las características a extraer. Por ello, al desplazarse la cámara debe ir acompañada de su sistema de iluminación asociado. En este caso, es importante que el sistema de iluminación sea ligero y robusto, pues va a ser desplazado rápidamente por el robot. De nuevo, la fuente de iluminación más apropiada en estas circunstancias son los LEDs, ya que permiten crear un sistema de iluminación compacto y resistente. Así, para iluminar la zona del moyú, se ha instalado junto a la cámara un arreglo lineal extraplano



Fig. 6. Sistema de visión embarcado junto a la etiquetadora

posible. Por ello, será necesario ubicar la cámara en una posición desde la cual se pueda adquirir una imagen clara y completa de la característica que se está buscando. La

de cinco LEDs, de 1 watio de potencia cada uno. La intensidad de la luz proyectada permite generar una zona brillante sobre el refrentado del moyú (ver fig. 8) que hará

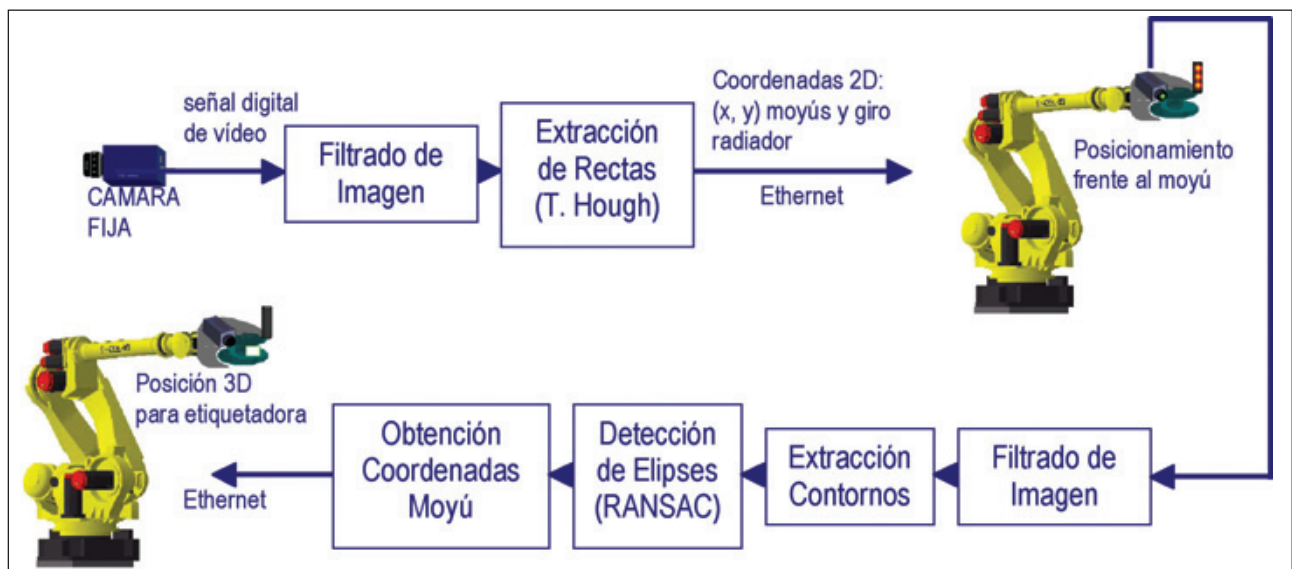


Fig. 7. Secuencia completa de los procesos de las imágenes.

más fácil la localización de la elipse que se busca en la imagen.

En la fig.7 se expone a modo de resumen la secuencia completa del procesamiento de imagen. Este comienza en el sistema fijo y finaliza en el sistema embarcado en el robot con la obtención de las coordenadas 3D del centro del moyú.

5.1. DETECCIÓN DE ELIPSES.

El procesamiento de la imagen capturada por la cámara móvil irá destinado a la detección del patrón elíptico originado por la proyección perspectiva de la circunferencia del moyú. Esta detección no es una tarea inmediata ya que

Los sistemas que trabajan sobre una única imagen operan identificando los patrones geométricos de características clave en la pieza (rectas, circunferencias, esquinas, taladros,...) y calculan su posición 3D y orientación comparando su proyección en la imagen con el conocimiento a priori de la forma y dimensiones de esas características.

en las imágenes, junto a dicha elipse, aparece un gran número de características originadas por los hilos de la rosca interior del moyú, las diversas aristas del radiador y algunas sombras. La gran cantidad de contornos originados por estas características complican enormemente la búsqueda del patrón elíptico (ver fig.8).

Como ya se ha indicado anteriormente, la transformada de **Hough** es uno de los métodos más populares para la detección de todo tipo de formas y, por supuesto, de elipses. El problema que tiene el empleo de esta técnica para la búsqueda de elipses es que, en este caso, el espacio de parámetros toma una dimensión que hace completamente inviable el cálculo en un margen de tiempo razonable. Existen versiones aleatorias del algoritmo original que disminuyen los tiempos de cálculo pero estas fallan sobre las imágenes de los moyús. Esto es debido a la existencia de un gran número de arcos elípticos (originados por los hilos de la rosca interna del moyú), con innumerables potenciales elipses correctas.

Para detectar la proyección del moyú en la imagen, se ha implantado un procedimiento de naturaleza estocástica denominado **RANSAC**, *RANdom Sample Consensus*, (Fischler & Bolles, 1981). Este algoritmo se ajusta muy bien a nuestro problema de detección de elipses pues proporciona el resultado mucho más rápidamente que la transformada de **Hough** y funciona de manera robusta en presencia del ruido generado por la rosca del moyú en nuestras imágenes. El **RANSAC** es una técnica para el ajuste de parámetros a un determinado modelo matemático a partir de datos que contienen tanto elementos que se ajustan al modelo predeterminado (*inliers*), como elementos que no se ajustan a dicho modelo por proceder de ruido extremo o errores (*outliers*). El algoritmo es robusto en el sentido de que ofrece una buena capacidad

para interpretar los datos de partida aunque exista entre éstos un número significativo de *outliers* con grandes errores. Los *outliers* en nuestro caso son los puntos de contorno que corresponden a otras características distintas de la elipse del moyú.

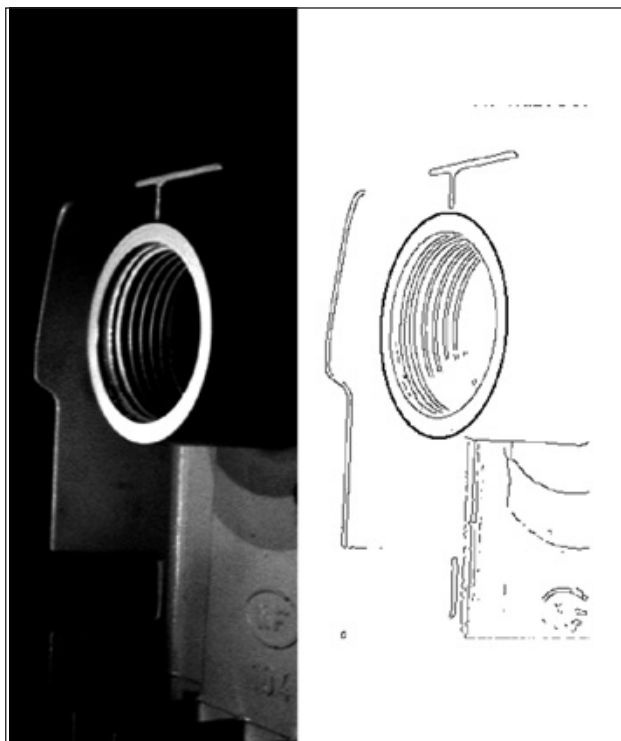


Fig. 8. A) imagen obtenida desde el robot.
B) elipse detectada.

La estructura de nuestro algoritmo **RANSAC** es simple pero eficaz. Dado que para definir una elipse se necesitan al menos cinco puntos, el algoritmo toma muestras aleatorias de cinco puntos entre los puntos de contorno que han sido elegidos como candidatos a pertenecer a la elipse. Para dirigir la selección aleatoria de los puntos candidatos se realiza un etiquetado previo de los puntos de contorno mediante un algoritmo de encadenamiento de contornos. Entre las cadenas obtenidas se eliminan aquellas cuyo gradiente y convexidad sea incompatible con el perímetro del moyú. Además, se exige que los 5 candidatos pertenezcan como mucho a dos conjuntos de etiquetas diferentes. Con cada muestra de cinco puntos se obtiene la ecuación de una elipse hipotética. A continuación, se evalúan las calidades de las hipótesis generadas cuantificando la calidad de cada modelo mediante una función de coste, que evalúa el número de puntos de contorno situados en un entorno de la elipse calculada. La hipótesis que mayor soporte obtiene por el conjunto de datos es la que es considerada como mejor estimador (ver fig.9).

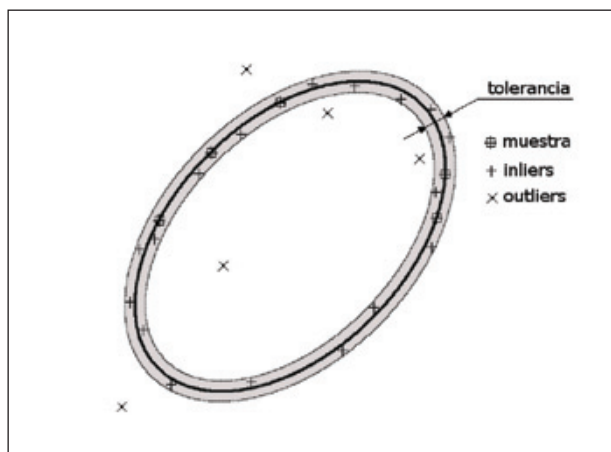


Fig. 9. Detección de elipses con el algoritmo RANSAC.

Con los *inliers* de la elipse ganadora se obtiene mediante mínimos cuadrados la ecuación de la elipse

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2(Dx + Ey) + F = 0$$

correspondiente al diámetro externo del moyú. Esta elipse puede ser representada en forma matricial como:

$$Q = \begin{bmatrix} A & B & D \\ B & C & E \\ D & E & F \end{bmatrix}$$

El cálculo de la posición 3D de la elipse respecto del sistema de referencia ligado a la cámara se obtiene a partir del radio del moyú, que es conocido e invariable, y de los autovalores y autovectores procedentes de la descomposición en valores singulares (SVD) de la matriz Q que define a la elipse. Puede verse la deducción matemática en Kanatani and Liu (1993).

Las coordenadas resultantes, una vez transformadas al sistema de referencia ligado al efector, son enviadas al controlador del robot para que éste ejecute la trayectoria para adherir la pegatina. Lógicamente, también en este caso el hardware de seguimiento de línea del robot actualiza la posición detectada del moyú desde que se adquirió la imagen 3D en cada pulso enviado por el encoder.

La estructura de nuestro algoritmo RANSAC es simple pero eficaz. Dado que para definir una elipse se necesitan al menos cinco puntos, el algoritmo toma muestras aleatorias de cinco puntos entre los puntos de contorno que han sido elegidos como candidatos a pertenecer a la elipse.

6. IMPLANTACIÓN Y RESULTADOS

El sistema hace uso de un único PC con procesador Intel Pentium 4 a 3.73 GHz *Hyper-Threading* bajo el sistema operativo *Microsoft Windows XP Professional* para llevar a cabo la computación requerida por ambos sistemas de visión. Tanto el sistema fijo como el embarcado en el robot incorporan cámaras digitales de resolución media de 480x640 píxeles que se comunican con el PC a través de una conexión IEEE 1394. La detección de rectas mediante el algoritmo basado en la transformada de **Hough** tiene un tiempo de ciclo medio de aproximadamente 0,05 segundos. La detección de elipses es más costosa y variable (depende en gran medida del número de arcos de elipse presentes en la imagen) y tiene un tiempo de ciclo que oscila entre 0,1 y 0,5 segundos.

El PC actúa como maestro de la instalación y el robot como esclavo (ver fig.10). Todas las maniobras de arranque y parada de la instalación se realizan a través de la interfaz gráfica. Las únicas maniobras que son regidas por el robot son las relativas a paradas de seguridad. La comunicación entre el PC y el controlador del robot se realiza a través de una línea *Ethernet*.

El PC dispone de un interfaz gráfico táctil que permite al usuario hacer el seguimiento del funcionamiento del sistema y reajustar a pie de línea de forma sencilla algunos de los parámetros, tales como mínima distancia permitida entre radiadores, velocidades y rampas de aceleración del robot, etc.

El sistema lleva ya en producción más de dos años manteniendo tasas de alrededor de 4000 etiquetas por turno

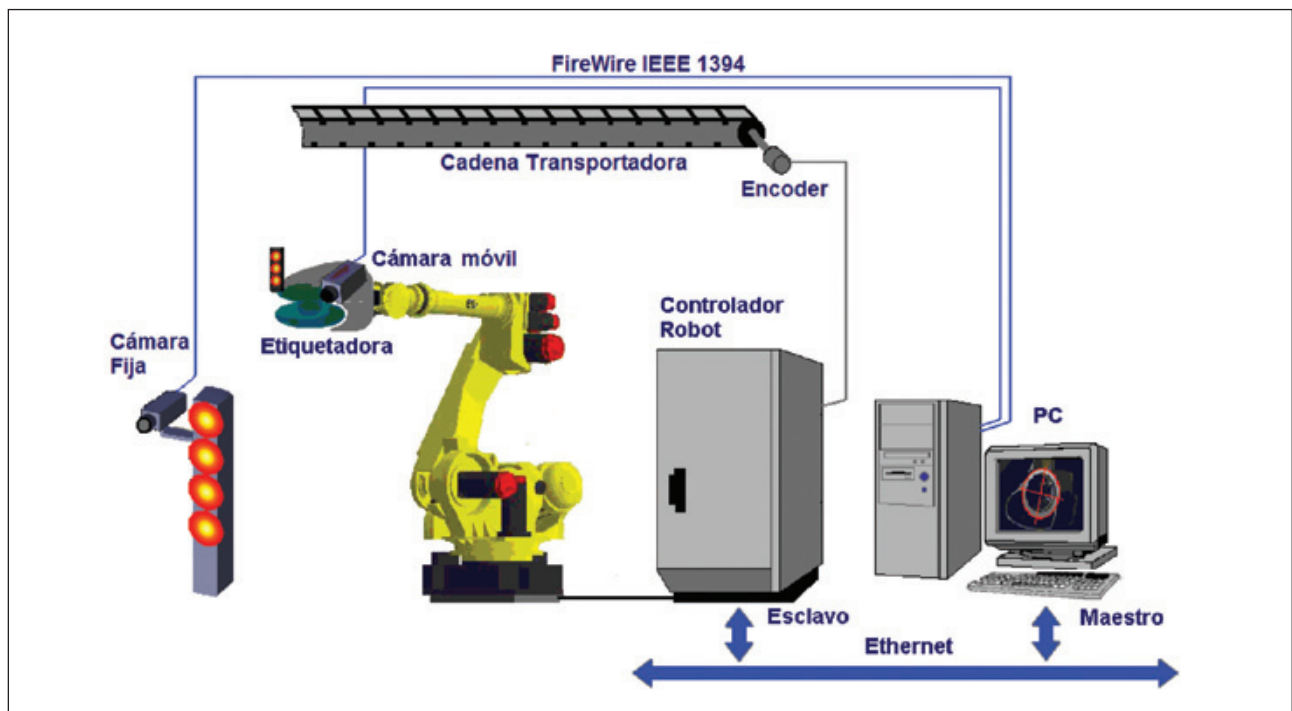


Fig. 10. Interconexión de los elementos del sistema

Para hacer frente a las posibles colisiones del robot con algún radiador, tanto el sistema de iluminación embarcado en el robot como el taco de succión portaetiquetas, están montados sobre un sistema de muelles que permite que todo el conjunto se retraiga ante una eventual colisión.

de trabajo. Durante este tiempo ha quedado patente la robustez mecánica de la instalación. Las cámaras protegidas por sendos carenados quedan aisladas de la enorme cantidad de polvo de pintura que existe en el ambiente.

Para hacer frente a las posibles colisiones del robot con algún radiador, tanto el sistema de iluminación embarcado en el robot como el taco de succión portaetiquetas, están montados sobre un sistema de muelles que permite que todo el conjunto se retraiga ante una eventual colisión. Cuando ésta se produce, un sensor inductivo lanza una señal que detiene la instalación. En ese supuesto, el operario, tras comprobar que no hay ningún daño, puede rearmar toda la instalación sin más que pulsar un botón en la pantalla táctil del sistema.

Las colisiones que se producen son debidas a las fuertes oscilaciones que esporádicamente aparecen en los radiadores y que se superponen al movimiento de avance de la cadena. Las oscilaciones tienen su causa en movimientos irregulares de avance de la larga cadena transportadora. Cuando la entrada del robot para colocar una pegatina en el espacio entre dos radiadores coincide con un fuerte tirón o frenazo de la cadena de transporte, se genera una gran oscilación que eventualmente origina la colisión. Aunque estas incidencias ocurren muy esporádicamente, como ya se ha apuntado anteriormente, el sistema se ha diseñado para no sufrir desperfectos ante esta situación.

En cuanto a los **resultados obtenidos en la colocación de las pegatinas** cabría distinguir dos aspectos: la precisión en la colocación y el grado de adherencia logrado en la operación. La precisión teórica con la que el sistema de visión detecta la posición 3D del moyú es menor de 0.2mm. Aparte de que los contornos son obtenidos mediante precisión subpixel (Devernay, 1995), el campo de visión del moyú es inferior a 100mm, lo que supone para un CCD de la cámara de 480 píxeles verticales una resolución por pixel de $100 / 480 \approx 0.2$ mm. Si tenemos en cuenta que las pegatinas elegidas tienen una dimensión comercial de 45mmx50mm y que el diámetro del moyú es de 40mm, se tiene un margen más que suficiente para absorber con total

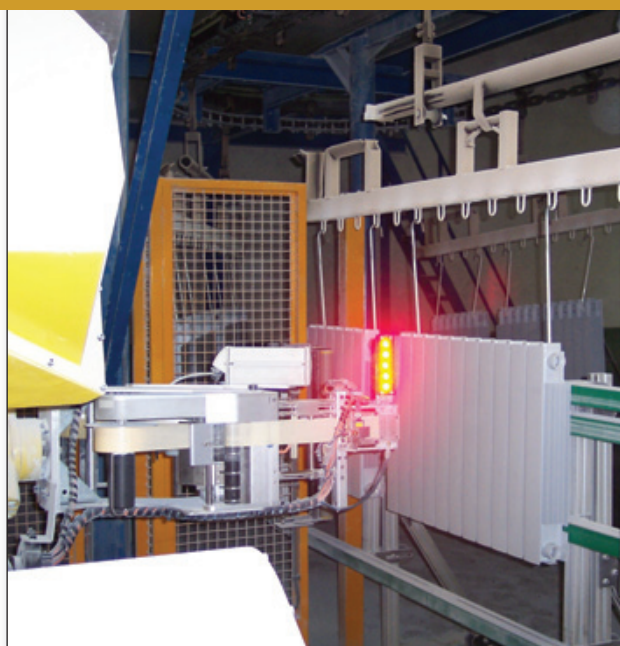


Fig.11 Como efector final el robot monta una etiquetadora automática estándar

garantía otras fuentes de incertidumbre del proceso, tales como la precisión de la propia etiquetadora y el error procedente de la calibración robot-cámara.

En lo que respecta al grado de adherencia con el que el sistema adhiere las pegatinas, éste se ha mostrado adecuado a lo largo de los dos años largos de funcionamiento de la instalación. La adhesión se ha logrado realizar de una manera fiable en el 98% de la veces gracias a un sensor láser que detecta el contacto entre pegatina y taco portaetiquetas, de tal forma que en ese instante, el mecanismo de succión que mantiene sujeta la pegatina se revierte y, junto con un ligero pero brusco movimiento de avance del robot, se lleva a cabo la adhesión de la pegatina de sellado.

Los movimientos oscilatorios bruscos de los radiadores son de nuevo el origen de que eventualmente la pegatina

no quede adherida con las garantías suficientes, llegando incluso a desprenderse. Esta incidencia no tiene apenas repercusión dado que se produce muy esporádicamente. Además, existe un puesto previo a la entrada del proceso de pintura epoxy-poliéster, donde se lleva a cabo un control de calidad general de todos los radiadores (rebabas, rayaduras, golpes, etc.) y donde esas pocas etiquetas mal adheridas o desprendidas pueden ser restituidas fácilmente.

7. CONCLUSIONES

A nivel mundial son muy pocas las aplicaciones de guiado tridimensional que se encuentran en las líneas de producción actualmente. Sólo algunas industrias del sector del automóvil han experimentando con la tecnología con algunas aplicaciones en producción pioneras.

Los resultados obtenidos en este proyecto de investigación demuestran que la tecnología tiene una madurez suficiente para su implantación industrial. El guiado de robots utilizando información 3D permite automatizar procesos donde hay que manipular productos de distintas forma o tamaño y productos que se encuentran en movimiento y todo ello de una forma muy competitiva debido a que no es preciso realizar grandes modificaciones sobre la línea.

La automatización de la tarea de sellado de radiadores mediante un robot guiado por visión ha evitado el montaje



de una costosa instalación mecánica. No han sido precisos nuevos elementos de anclaje o sofisticados sistemas de alimentación para clasificar y orientar los radiadores, que de otra forma hubieran sido necesarios para el sellado automático de los moyús. Este ahorro ha permitido que el periodo de recuperación de la inversión en la instalación ha sido de poco más de dos años.

Sí debemos reseñar que, precisamente por no introducir modificaciones en la instalación ya existente, los radiadores colgados se mueven con una libertad que en algunas situaciones puede resultar excesiva incluso para un robot guiado por visión. La mayor parte de las incidencias que se han producido han sido como consecuencia de fuertes oscilaciones que aparecen esporádicamente en los radiadores inducidas por irregularidades en el avance de la cadena transportadora de la que se encuentran colgados. Si se origina un tirón o enganchón en la cadena justo cuando el robot se ha aproximado a colocar la etiqueta, se producirá inevitablemente una colisión. Por ello se han diseñado los componentes más expuestos de la etiquetadora para que vayan montados sobre unos muelles que sean los que se deformen ante el choque.

Otro tipo de incidencias menos frecuentes han sido los atascos de la etiquetadora, problema común a todas las líneas de etiquetado. En nuestro sistema, el avance del rollo de las pegatinas es controlado también mediante un sensor, de tal forma que este problema se detecta de forma inmediata.

El guiado de robots utilizando información 3D permite automatizar procesos donde hay que manipular productos de distintas forma o tamaño y productos que se encuentran en movimiento, y todo ello de una forma muy competitiva debido a que no es preciso realizar grandes modificaciones sobre la línea

La automatización de la tarea de sellado de radiadores mediante un robot guiado por visión ha evitado el montaje de una costosa instalación mecánica.

En cuanto al sistema de visión en sí, se ha mostrado realmente fiable. El sistema es completamente inmune a cambios en la iluminación de la planta gracias a la potencia y robustez de los sistemas de iluminación integrados por LEDs y a que los algoritmos de detección de patrones empleados están basados en la extracción de contornos, características que son especialmente estables ante posibles cambios de iluminación. Los algoritmos de la transformada de Hough y RANSAC utilizados para la detección de rectas y elipses respectivamente son relativamente costosos desde el punto de vista de computacional pero han demostrado una gran fiabilidad en la detección de los patrones buscados. De cualquier forma el tiempo de procesamiento se encuentra dentro de unos márgenes muy amplios para esta aplicación pues el PC instalado permite ejecutar estos algoritmos en tiempos que no llegan a la décima de segundo para el caso de las rectas y nunca superiores a las cinco décimas para el caso de las elipses, tiempos que dejan mucho margen para el cálculo ante el valor promedio de cuatro segundos que hay disponibles por moyú a la velocidad de producción de la línea.

Para concluir señalaremos que aunque este sistema se ha diseñado específicamente para esta tarea de sellado de moyús de radiadores, la mayor parte de la labor realizada en este proyecto es directamente extrapolable a la robotización de otras tareas industriales. El sistema desarrollado puede aportar grandes ventajas especialmente en tareas de ensamblado automático en cadenas de fabricación en movimiento continuo como las existentes en plantas de montaje de automóviles o en la descarga automática de contenedores de piezas (*bin picking*). Aunque sería preciso redefinir la estrategia a seguir en cada aplicación concreta, tanto el enfoque utilizado, empleando dos sistemas de visión, como los algoritmos de detección desarrollados para las rectas y elipses serían perfectamente válidos en nuevas aplicaciones. No se precisaría de un gran esfuerzo en la programación de nuevos algoritmos para la detección de nuevas formas ya que a nivel industrial la mayoría de las aplicaciones son resolubles mediante la detección de segmentos de recta, arcos de circunferencias o elipses.

En la dirección <http://www.eis.uva.es/~disa/html/personal/eusfue/VideoRobotVision.WMV> puede verse un vídeo del sistema en funcionamiento.

8. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido desarrollada en colaboración con la empresa DESMASA S.L. (Burgos, España) y financiada por Industrias RAYCO S.A. en Briviesca (Burgos, España) y por la Junta de Castilla y León y los Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER).

9. BIBLIOGRAFIA

- Ballard DH, "Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes", *Pattern Recognition*. 1981. Vol.13, No. 2, p. 111-122.
- Calvo M. 2005 Engine Head Decking With Integrated Robot and Machine Vision System. *Robotics Online*, [Online]. Disponible en: http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-News/Engine-Head-Decking-With-Integrated-Robot-and-Machine-Vision-System/content_id/226 [Accedido: 7 marzo 2009].
- Devernay F. *A Non-Maxima Suppression Method for Edge Detection with Sub-Pixel Accuracy*. INRIA, 1995. Rapport de recherche n°2724. ISSN 0249-6399.
- Fischler MA and Bolles RC. "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography". En: *Comm. of the ACM*, 1981 Vol 24, pp 381-395.
- Forsyth D and Ponce J. *Computer Vision. A Modern Approach*. New Jersey: Prentice Hall Pearson Education 2003. 693 p. ISBN 0-13-085198-1.
- Hough PVC. 1962. *Methods and Means for Recognizing Complex Patterns*. U.S. Patent 3069654.
- Kanatani K and Liu W. "3D interpretation of conics and orthogonality", *CVGIP: Image Understanding*, Nov. 1993. Vol. 58, No. 3, p. 286 - 301.