

Visión artificial para la detección automática de aristas en procesos de acabado de componentes aeronáuticos

Mikel González-Esteban¹, Unai López-Saratxaga², Adrián Rodríguez-Ezquerro³, Octavio Pereira-Neto⁴, Luis Norberto López-De Lacalle⁵

Centro Fabricación Avanzada Aeronáutica – Universidad del País Vasco (UPV/EHU), España.
Email: ¹mikel.gonzalez@ehu.eus, ²lopezsaratxaga@gmail.com, ³adrian.rodriguez@ehu.eus, ⁴octaviomanuel.pereira@ehu.eus, ⁵norberto.lzlacalle@ehu.eus

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo e integración de técnicas de procesamiento de imágenes para la caracterización de aristas en componentes de motores aeronáuticos. Algunas características de este tipo de componentes presentan aristas con elevadas tolerancias dimensionales, tanto en forma como en posición. La diferencia en la morfología entre la arista nominal y la real ha de ser conocida para poder realizar un proceso de acabado automatizado. Es por ello que a día de hoy muchos de estos procesos finalistas se realizan mediante operaciones manuales. El empleo de técnicas de visión artificial se presenta como una solución económica, rápida y robusta para la caracterización geométrica de este tipo de aristas. En este artículo el proceso de detección de aristas se desarrolla utilizando cámaras fotográficas convencionales. Los resultados muestran que el proceso es adecuado para los objetivos marcados, consiguiendo identificar aristas con tolerancias inferiores a las 5 décimas de milímetro.

Palabras clave: Visión artificial; Procesamiento de imágenes; Detección de aristas; Filtrado de rebabas; OpenCV

Abstract

This work presents the development and integration of image processing techniques for the characterisation of edges in aeronautical engine components. Some features of this type of component present edges with high dimensional tolerances, both in shape and position. Thus, the morphological difference between the nominal and the real edge must be known in order to be able to carry out an automated finishing process. Currently, many of these final processes are still conducted by manual operations. Hence, the use of artificial vision techniques is presented as an economical, fast and robust solution for the geometric characterization of this type of edges. In this work, the detection process is carried out by using standard cameras on test pieces. Results show that the process meets the objectives set, identifying edges with tolerances of less than 5 tenths of a millimetre.

Keywords: Artificial vision; Image processing; Edge detection; Burr filtering; OpenCV

1. Introducción

Hoy en día dentro del sector aeronáutico aún se siguen realizando operaciones manuales, sobre todo el acabado de piezas de alto valor añadido. En la fabricación de las turbinas de presión intermedia de los motores, ésta se realiza a partir de la unión de un anillo forjado con otro fundido. Éste incorpora unos cuerpos extruidos, conocidos como bosses, para el acople de conexiones externas. Debido a la naturaleza del proceso de fabricación, estas geometrías presentan desviaciones de hasta $\pm 1\text{mm}$. Además, llevan asociadas unas operaciones posteriores de planeado y

taladrado para el ajuste con las conexiones del motor. En el acabado de estas piezas, se requiere eliminar la rebaba producida durante dicho planeado, generando un chaflán uniforme a lo largo de todo el contorno de los bosses [1]. En la automatización del proceso es común el empleo de robots, gracias a su alta flexibilidad y menor coste operativo en comparación con las máquinas CNC actuales. Sin embargo, queda por resolver la detección automática de las aristas de las piezas, para poder ajustar las trayectorias a las variaciones que presenten cada una de estas piezas y conseguir un acabado uniforme en todo el contorno.

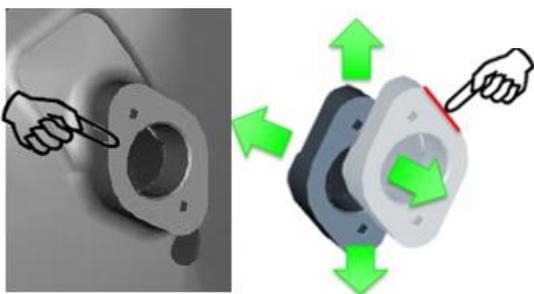


Figura 1. Variabilidad en la morfología de las piezas fabricadas por fundición. Fuente: [1].

1.1. Sistemas para detección de aristas

En la actualidad, en la detección de aristas se emplean equipos por contacto u ópticos. Las sondas de posicionamiento por contacto ofrecen la mejor precisión, pero la captación individual de puntos es muy lenta y se requiere un elevadísimo número de puntos para definir un contorno completo. En cambio, los sistemas basados en visión suelen emplear costosos escáneres para obtener la geometría de las piezas mediante triangularización. En este trabajo, se pretende sustituir estos equipos por una cámara fotográfica, que permita detectar las aristas desviadas de las piezas de forma rápida y económica a través del procesamiento de una única imagen. Además de detectar y posicionar el contorno de las piezas, debe ser capaz de filtrar el ruido generado por las rebabas, para poder emplear las líneas suavizadas del contorno como referencia para el diseño de las trayectorias de rebabado. Los ensayos de captación se han realizado sobre piezas test representativas, diseñadas específicamente para estos ensayos mediante fabricación aditiva en Inconel 718. Para simular los defectos debidos al proceso de fundición, se han producido piezas con desviaciones en el contorno de $\pm 1\text{mm}$. Todas las piezas test llevan asociadas la misma operación de taladrado y planeado que en la pieza real. El equipo utilizado en este trabajo es una cámara de 24 megapíxeles, para una distancia focal fijada en 18mm.

2. Metodología

La metodología desarrollada está orientada a las características descritas del proceso de fabricación de turbomaquinaria. Para poder emplear una cámara de fotos como equipo de medición se requiere trabajar sobre un único plano (el de la superficie mecanizada) y disponer de una característica de la pieza de dimensiones y posición conocidas. En el caso de aplicación de este trabajo, el agujero interior principal es conocido, ya que se emplea en el posicionamiento de la pieza en la célula robotizada.

Antes de comenzar con la captura de imágenes, hay una serie de consideraciones a tener en cuenta cuando se pretende obtener imágenes representativas de la geometría real de las piezas.

2.1. Distorsión de la lente

El término distorsión hace referencia al cambio de la representación geométrica de un objeto en el plano de la imagen. Esto puede causar serios problemas en las aplicaciones de visión artificial, cuando se requieren imágenes representativas de los objetos a medir. Los fenómenos atribuidos a la lente son conocidos y pueden corregirse con la calibración previa del equipo.

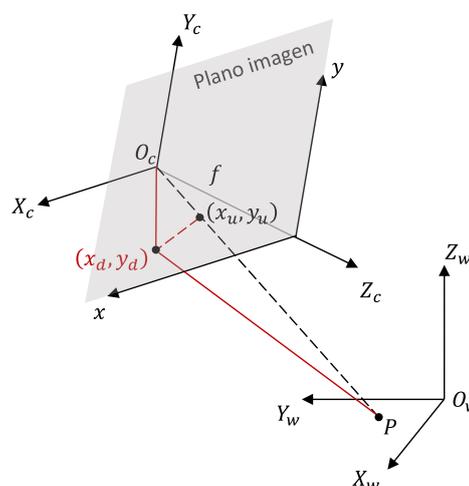


Figura 2. Geometría de la cámara: coordenadas globales (X_w, Y_w, Z_w), coordenadas de la cámara (X_c, Y_c, Z_c), coordenadas proyectadas ideales (x_u, y_u) y distorsionadas (x_d, y_d).

2.1.1. Corrección de la distorsión radial

Producida por una curvatura desigual de la luz. Los rayos se curvan más cuanto más alejados se encuentran del centro de la lente, haciendo que las líneas rectas del mundo real aparezcan curvadas en la imagen. El rayo de luz se desplaza radialmente hacia dentro o hacia fuera de su ubicación ideal antes de llegar al sensor de la cámara. Esto puede provocar los siguientes efectos:

- Distorsión de barril (desplazamiento radial negativo).
- Distorsión de cojín (desplazamiento radial positivo).

Esta distorsión se corrige de la siguiente manera:

$$x_{corr.} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (1)$$

$$y_{corr.} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (2)$$

2.1.2. Corrección de la distorsión tangencial

Ocurre cuando el objeto capturado está en ángulo con respecto al objetivo. Así, la imagen parece estar inclinada y estirada. Se resuelve tal que:

$$x_{corr.} = x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \quad (3)$$

$$y_{corr.} = y + [2p_2xy + p_1(r^2 + 2y^2)] \quad (4)$$

2.1.3. Calibración de la cámara

Este tipo de alteraciones de la imagen son dependientes del objetivo utilizado en la cámara. Por tanto, debe realizarse una calibración del sistema cada vez que se cambien las lentes de la cámara o en la puesta en marcha de la máquina. El proceso de calibración se centra en obtener los coeficientes de distorsión (k_1, k_2, p_1, p_2, k_3) para aplicarlos posteriormente y corregir las imágenes. Éstos se calculan a partir de los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara. Los parámetros extrínsecos corresponden a vectores de rotación y traslación que traspasan las coordenadas de un punto 3D a un sistema de coordenadas. Mientras, los parámetros intrínsecos son específicos de la lente de la misma [2]. La matriz intrínseca es una matriz triangular superior de dimensión 3x3 tal que:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

f_x, f_y son la distancia focal en x-y (suelen ser iguales). c_x, c_y son las coordenadas x-y del centro óptico en el plano de la imagen. γ es la distorsión entre los ejes, que suele ser 0 habitualmente.

Para obtener estos valores, se realizan varias fotografías de un objeto o patrón de dimensiones conocidas desde diferentes puntos de vista. Lo más habitual es utilizar paneles con dibujos basados en tableros de ajedrez o con patrones circulares. Los tableros de ajedrez son ideales porque permiten localizar fácilmente las esquinas de los cuadrados, al tener gradientes pronunciados en dos direcciones. Además, estas esquinas también están relacionadas por el hecho de que se encuentran en la intersección de las líneas del tablero. Las coordenadas de estos puntos son conocidas tanto en el espacio 3D como en la imagen, permitiendo resolver así el problema matemático [3] y obtener los coeficientes de distorsión. Las imágenes se capturan manteniendo el tablero estático y orientando la cámara en diferentes posiciones. Para obtener buenos resultados, se recomienda emplear al menos 10 imágenes diferentes del patrón.

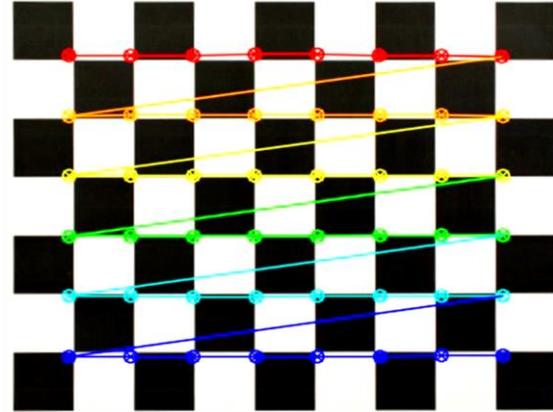


Figura 3. Tablero de ajedrez con la distorsión corregida.

En la Figura 3 se muestra el resultado obtenido tras la calibración, donde los puntos superpuestos se corresponden a las aristas de los cuadrados originales distorsionados, pudiendo apreciar así la curvatura que presentaban antes de la corrección.

2.2. Distorsión de la perspectiva

La distorsión de perspectiva es la transformación que sufre un objeto y su entorno circundante debido a la proximidad del mismo respecto al objetivo y a la dirección de observación. Esto provoca variaciones en las distancias relativas aparentes de los objetos que componen la imagen, falseando sus dimensiones y formas reales. Para minimizar este efecto, puede adoptarse una dirección de observación frontal a la pieza de trabajo a una distancia de separación suficiente tal que pueda considerarse un modelo de proyección ortográfica [4]. De esta manera, se considera que el rayo de luz viaja paralelo al eje óptico. Si los puntos capturados se encuentran en un plano paralelo al plano de la imagen, la fotografía resultante es esencialmente una versión a escala de la pieza original. El valor de la escala viene determinado por la relación entre la distancia focal (f) y la distancia media de los puntos capturados (\bar{Z}) tal que:

$$s = \frac{f}{\bar{Z}} \quad (6)$$

Así, la relación entre los puntos de la imagen y los puntos 3D es directa:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (7)$$

La proyección ortográfica es por tanto una buena aproximación cuando la variación de la profundidad entre los puntos capturados es mucho menor que la distancia de los puntos al plano de la imagen. De esta manera, para minimizar la distorsión de la perspectiva, se controla el posicionamiento de la cámara orientándola frontalmente con la pieza, aprovechando la superficie generada en la operación de planeado, a una distancia de separación de más de 500 mm, suficiente en este caso.

2.3. Detección de aristas

Una vez corregidas y controladas todas las posibles distorsiones, puede iniciarse la captura de imágenes sobre la pieza de cara a iniciar la identificación automática de su geometría. Para ello, el método desarrollado se basa en emplear una plantilla con la forma nominal de la pieza, para dar con el contorno que mejor se ajuste a la misma.

La caracterización de la imagen se realiza mediante sus momentos, calculados sobre todos los contornos identificados previamente. Un momento es una característica bruta del contorno que se calcula integrando sobre todos los píxeles del mismo:

$$m_{p,q} = \sum_{i=1}^n I(x,y)x^p y^q \quad (8)$$

Sin embargo, los momentos simples dependen del sistema de coordenadas elegido, haciendo que los objetos no se emparejen correctamente si están rotados. Los momentos de Hu son 7 momentos invariantes a la rotación, escala y traslación calculados a partir de combinaciones lineales de los momentos normalizados [5] (para hacerlos independientes de la escala global del objeto). Así, es posible obtener funciones invariantes que representen diferentes características de la pieza. Para dos imágenes dadas (la de la pieza A y su plantilla de referencia B), se establece la siguiente comparación:

$$I_1(A,B) = \sum_{i=1}^7 \left| \frac{1}{m_i^A} - \frac{1}{m_i^B} \right| \quad (9)$$

Siendo:

$$m_i^A = \text{sign}(h_i^A) \cdot \log|h_i^A| \quad (10)$$

$$m_i^B = \text{sign}(h_i^B) \cdot \log|h_i^B| \quad (11)$$

Dónde h_i^A y h_i^B son los momentos de Hu de A y B respectivamente. De esta manera, se pueden comparar todos los contornos identificados de la pieza con el de la plantilla de referencia, logrando identificar el contorno exterior de la pieza incluso cuando éste

presenta ligeras desviaciones por deformaciones o rebabas.

2.3.1. Binarización de la imagen

Los contornos a comparar son identificados mediante métodos de segmentación. Estos métodos se basan en asignar cada píxel de la imagen a un cierto grupo, mediante la comparación de su nivel de gris con un cierto valor umbral. Así, la imagen de partida se “binariza” en dos segmentos: el fondo de la imagen y los objetos buscados. El nivel de gris de un píxel equivale a su nivel de luminosidad (0 negro, 255 blanco). La clave en estos métodos, por lo tanto, es la elección del valor umbral adecuado. Si los objetos a capturar se distinguen fácilmente del fondo de la imagen, y ésta se encuentra correctamente iluminada, puede asignarse un valor umbral global a la hora de realizar la segmentación. Para determinar el valor umbral más adecuado, existen métodos para su cálculo a través del histograma de la imagen en escala de grises. El método de Otsu [6] se basa en encontrar el valor umbral (t) que minimiza la varianza ponderada dentro de la clase dada por la relación:

$$\sigma_w^2(t) = q_1(t)\sigma_1^2(t) + q_2(t)\sigma_2^2(t) \quad (12)$$

Dónde $q_1(t)$, $q_2(t)$ son las probabilidades de las dos clases segmentadas por el valor umbral (t), comprendido entre 0 y 255. Sin embargo, cuando el gradiente de iluminación de la imagen es elevado, o hay presencia de grandes reflejos (algo habitual en piezas metálicas mecanizadas), debe emplearse un valor umbral distinto en cada zona de la pieza. En el caso mostrado en la Figura 4, los métodos globales no permiten segmentar el contorno completo de la imagen, mostrando zonas oscuras que no permiten identificar los bordes inferiores de la pieza.

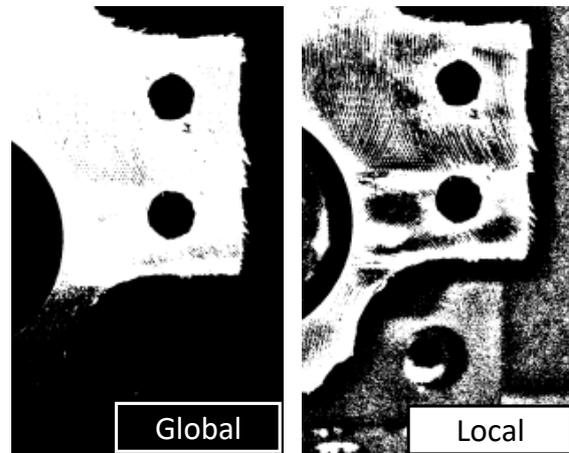


Figura 4. Binarización de imágenes con valor umbral global (Método de Otsu, izq.) y local (Método adaptativo con media aritmética, dcha.).

Las técnicas de segmentación adaptativa [7] obtienen diferentes valores para cada región de la imagen, permitiendo detectar contornos en condiciones de mala iluminación. En estos casos, es importante elegir un tamaño adecuado de vecindad de píxeles a la hora de calcular cada umbral local. Éste debe ser lo suficientemente grande para cubrir los píxeles necesarios de fondo y primer plano del objeto, de lo contrario el valor umbral local será irrelevante. Sin embargo, si se establece una región demasiado grande, se pierde el principio de umbralización local, obteniendo resultados muy similares a los métodos globales. A la hora de calcular el valor umbral local, los métodos más habituales emplean la media aritmética o la media gaussiana de las intensidades de píxeles en cada región. En la media aritmética, cada píxel de la vecindad contribuye por igual al cálculo, mientras que en la media gaussiana los píxeles más alejados al centro de coordenadas de la región contribuyen en menor medida. La fórmula general para el cálculo del valor umbral local (t_L) es:

$$t_L = \text{media}(I_L) - C \quad (13)$$

Dónde la media puede ser aritmética o gaussiana, I_L es la subregión local de la imagen y C una constante que podemos usar para ajustar el umbral local.

2.4. Escalado de la imagen

Hasta ahora se ha trabajado únicamente sobre los píxeles que componen la imagen de la pieza. Para poder asignar las coordenadas correspondientes a cada píxel, es necesario apoyarse en alguna característica de la imagen cuya geometría sea conocida. De esta manera, se relaciona su dimensión real con el número de píxeles contenidos en ella, obteniendo el valor de la escala a aplicar al resto de elementos de la imagen. Tal y como se ha comentado previamente, se emplea el agujero generado en el taladrado previo, cuya dimensión y posición es conocida a partir del posicionamiento de la pieza en máquina. Los puntos del contorno identificado se escalan según su diámetro y se referencian a partir de su centro, para hacerlo compatible con el sistema de referencia generado en el posicionamiento del agujero. Para dar una idea del ajuste alcanzable mediante esta tecnología, se ha diseñado un montaje adicional con una cala patrón cerámica (grado K0) de 100 mm de longitud, junto a un bloque IIW-Type 1 que contiene un agujero calibrado de $\phi 50,775$ mm.

El primer factor limitante que existe para obtener una buena medición es el tamaño de la fotografía: cuantos más píxeles contengan los objetos a medir menor será su factor de escala, posibilitando realizar mediciones más ajustadas al valor real del objeto. Sin embargo, tal y como se ha comentado previamente, para poder ajustarse a un modelo de proyección ortográfico es

necesario realizar la fotografía a una determinada separación de la cala, disminuyendo la relación entre objeto y fondo en la imagen. Para una separación de 500 mm, la Figura 5 muestra la relación entre el factor de escala y el tamaño de la imagen (abajo).

Se aprecia cómo, para obtener un factor de escala inferior a la décima de milímetro, se requiere emplear un equipo con una resolución de al menos 5 megapíxeles en la dirección de medición. Arriba en la Figura 5, se muestra el efecto de la amplificación del error en la medición a medida que se incrementa el factor de escala. En función del nivel de gris que adquieran los píxeles en el contorno de la pieza, éstos son segmentados como parte del objeto o, en su defecto, del fondo de la imagen. Si se modifica el tamaño de la imagen, además del número de píxeles, también se altera el nivel de intensidad de cada uno, haciendo que entren o salgan fuera de los límites de la pieza afectando al resultado de la medición (de ahí la dispersión en los resultados para distintos tamaños de imagen). Por cada píxel que se salga del área del objeto a medir, se añade un error igual al factor de escala empleado, tal y como se aprecia en la Figura 5. Para minimizar el número de píxeles de la pieza asociados con el fondo, y con ello el error, la fotografía debe realizarse bajo una exposición adecuada que permita diferenciar de forma clara el contorno del objeto. A continuación se muestra el procedimiento para regular los parámetros de exposición de la cámara, para unas condiciones de iluminación directa favorables de 500 lux.

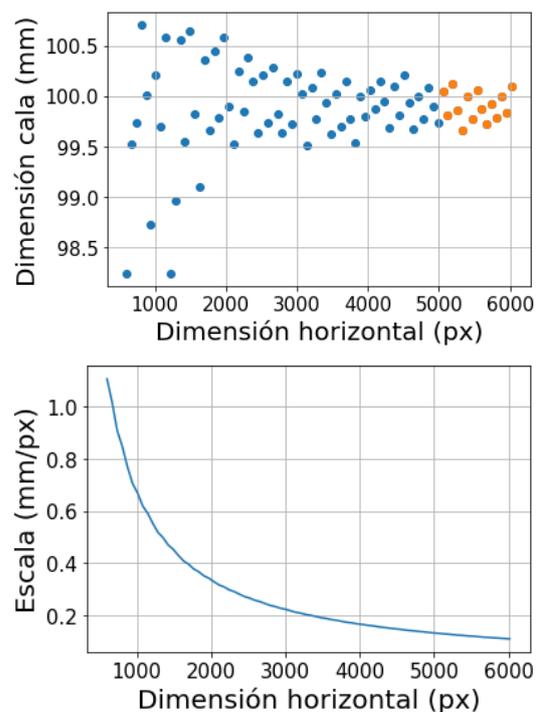


Figura 5. Influencia del escalado en la medición.

El primero de estos parámetros a controlar es la sensibilidad del sensor a la luz (ISO). Una sensibilidad baja (ISO 100) necesita más luz para lograr una buena exposición, pero reduce el ruido o la granulación, lo cual es positivo cuando se trata de obtener unos bordes definidos en los objetos capturados. El siguiente parámetro a tener en cuenta es la apertura del diafragma. Al haber fijado un valor reducido de ISO, se requiere una gran apertura para maximizar la entrada de luz al sensor, pero esto puede reducir la profundidad de campo hasta el punto en el que aparezcan zonas desenfocadas en algunas piezas. En este caso, al trabajar orientados sobre piezas con un plano de mecanizado, no se experimenta ese problema en el enfoque. La máxima apertura del sensor en este caso (factor de 3.5) otorga una profundidad de campo de unos 100 mm, más que suficiente para la pieza de trabajo. Por último, la última variable que define la exposición de la fotografía es el tiempo (t) que permanece abierto el obturador, en cuyo valor nos basamos entonces a la hora de ajustar la exposición de la fotografía.

En la Tabla 1 se muestran diferentes mediciones realizadas sobre fotografías variando el tiempo de exposición. El valor de exposición equivalente para un ISO 100 (EV100) sirve de referencia para cuantificar esta exposición. Los resultados muestran la media y la desviación típica de las imágenes con un factor de escala inferior a la décima de milímetro (destacados en color naranja en la Figura 5, para el caso de la imagen sobreexpuesta).

Tabla 1. Mediciones obtenidas bajo diferentes condiciones de exposición, para valores de escala por debajo de 0,1 mm/píxel.

Imagen	t	EV ₁₀₀	\bar{x} [mm]	σ [mm]
Sobreexpuesta	1/6	6,20	99,904	0,138
Balanceada	1/40	8,94	99,815	0,126
Subexpuesta	1/250	11,58	99,423	0,140

Los resultados obtenidos muestran un mayor grado de ajuste con la dimensión real de la cala en la imagen sobreexpuesta. Bajo estas condiciones, se incrementa el nivel de intensidad en los píxeles de la pieza, evitando que se segmenten como parte del fondo de la imagen durante el proceso de binarización. A medida que se disminuye la exposición, se pierden más píxeles en la segmentación del borde, obteniendo resultados más alejados del valor real de la pieza.

2.5. Filtrado de rebabas

Volviendo a la pieza objetivo del trabajo, el contorno exterior de la pieza obtenido a partir de las operaciones previas presenta perfiles de rebabas capturadas de manera dispersa a lo largo de toda la pieza.

Las trayectorias de mecanizado del contorno no deben copiar el ruido ocasionado por las rebabas, por lo que debe realizarse un filtrado efectivo de las mismas respetando las posibles desviaciones que pueda presentar la pieza fundida. La mayor parte de las rebabas presentes en la pieza tienen una forma dentada que puede ser eliminada mediante operaciones morfológicas. Con ello, se puede reducir el tamaño del ruido presente en el contorno, para poder así emplear filtros de paso bajo y obtener un resultado más estilizado.

2.5.1. Operaciones morfológicas (Closing & Opening)

Las operaciones morfológicas son aquellas en las cuales la topología de un objeto es alterada, por medio de un elemento estructurador, dando lugar a una forma más definida. La mayoría de estas operaciones se definen a partir de dos operaciones básicas: erosión y dilatación [8].

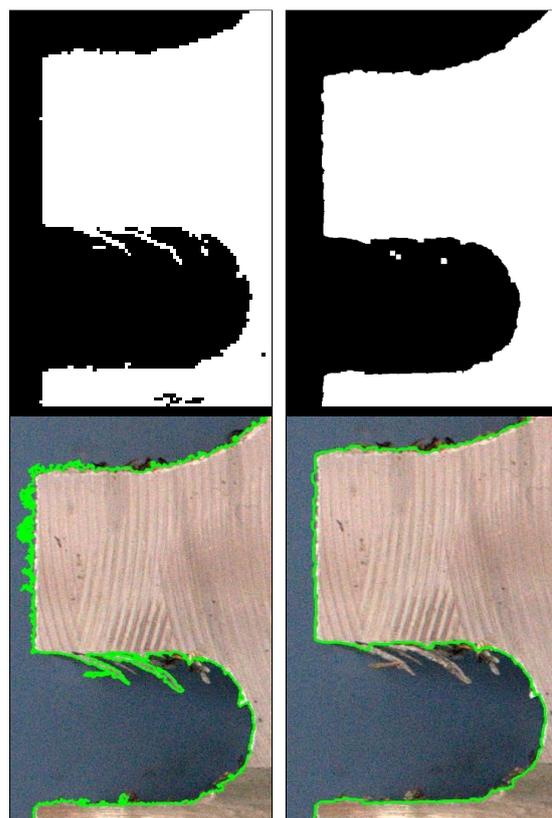


Figura 6. Filtrado de rebabas de espesor reducido mediante operaciones morfológicas.

La erosión elimina los límites de las regiones de píxeles en primer plano, reduciendo su área pero a la vez que se conserva la estructura.

Suponiendo que el objeto X y el elemento estructural B se encuentran representados en el espacio Euclidiano bidimensional, donde B_x es la traslación de B de forma que su origen esté situado en x , entonces la erosión de X por B se define como el conjunto de todos los puntos x tales que B_x está contenido en X .

$$\text{Erosión: } X \ominus B \triangleq \{x: B_x \subset X\} \quad (14)$$

Para evitar generar grietas o eliminar parte del material de la pieza en la operación de erosión, conviene rellenar el contorno de la pieza en una operación preliminar. De forma similar, la dilatación de X por B se define como el conjunto de todos los puntos x tales que B_x y X tienen una intersección no vacía. En otras palabras, amplía gradualmente los límites de las regiones de píxeles en primer plano.

$$\text{Dilatación: } X \oplus B \triangleq \{x: B_x \cap X \neq \emptyset\} \quad (15)$$

A la hora de reducir el ruido generado por la presencia de rebabas de forma dentada, se emplean operaciones de apertura, que no es más que aplicar una erosión seguida de una dilatación. Así, se logra aproximar los puntos más alejados de las rebabas al contorno real de la pieza, para facilitar su suavizado en operaciones posteriores. La forma y tamaño del elemento estructural, o kernel, determina el resultado final obtenido. Se trata de matrices núcleo que pueden ser rectangulares, en cruz o elípticas, en función de cómo tengan repartidos sus valores a lo largo de la matriz. En el caso de la Figura 6, se ha empleado un kernel rectangular de 35x35.

2.5.2. Suavizado de la señal

El contorno obtenido tras las operaciones morfológicas aún presenta cierto ruido en las raíces de las rebabas que debe suavizarse para evitar movimientos bruscos en el mecanizado. Los filtros de paso bajo son de gran utilidad en esta tarea, ya que permiten el paso de las frecuencias más bajas (topología de la pieza) y atenúan las frecuencias más altas (ruido de las rebabas). Para poder aplicarlos sobre el contorno, se actúa sobre la desviación obtenida con respecto a la geometría nominal de la pieza.

Un ejemplo básico de estos filtros es el de Butterworth [9], capaz de reducir el ruido de manera efectiva. Sin embargo, en el caso de piezas donde el gradiente de deformación sea elevado (como en el caso de la pieza test deformada en este trabajo), no es capaz de ajustarse bien a las transiciones por el suavizado que introduce a la forma de la pieza. Para estos casos, el filtro de Savitzky-Golay [10] resulta ser más efectivo, ya que respeta mejor los máximos y mínimos relativos de la señal, así como el ancho de los picos, como se aprecia en la Figura 7. El filtro de Savitzky-Golay realiza una regresión polinomial local (de grado k), con al menos $k+1$ puntos equidistantes, para determinar el nuevo valor de cada punto. De esta manera, simula una ventana que se desliza por los datos, suavizándolos a partir de los datos de la ventana. El resultado final del filtrado dependerá por tanto de la elección correcta del orden del polinomio de ajuste y el tamaño de la ventana de puntos escogida.

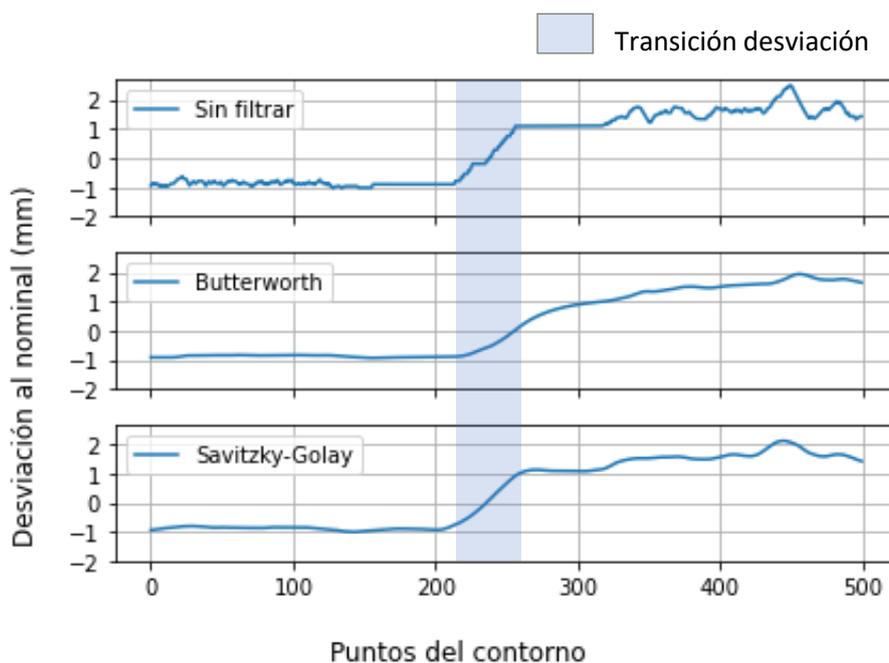


Figura 7. Comparación entre filtros de paso bajo en la zona de transición.

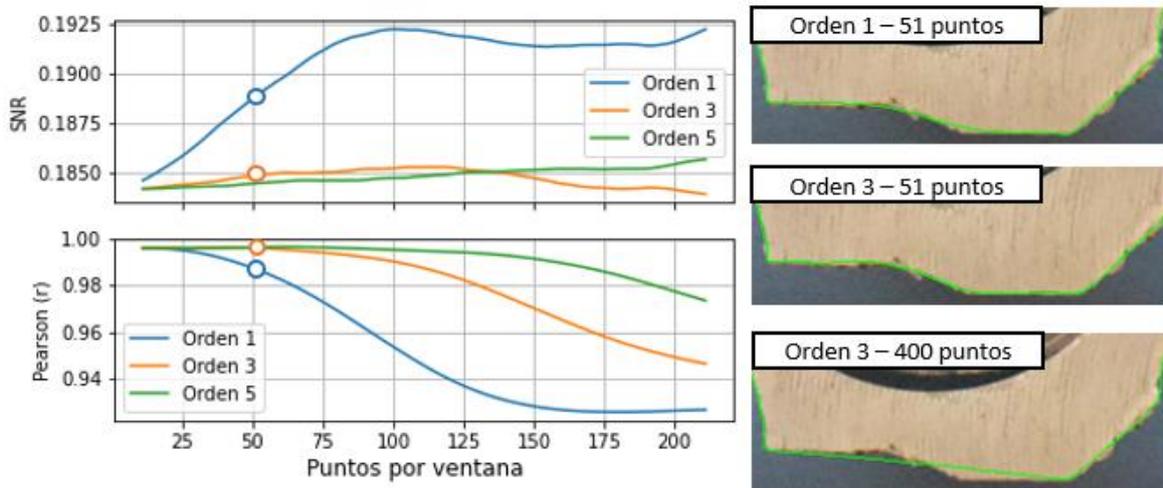


Figura 8. Optimización de parámetros de filtrado (Savitzky-Golay).

Para poder definir estos parámetros de forma adecuada, se han establecido dos ratios para evaluar el resultado sobre la desviación esperada de la pieza. Por un lado, el SNR (Signal to Noise Ratio) aplicado directamente a la nueva señal filtrada. El cálculo de este parámetro se obtiene a partir de la relación entre la media de la señal filtrada y su desviación estándar [11].

$$SNR = \frac{\mu}{\sigma} \quad (16)$$

Cuanto más alto sea este valor, menos ruido tiene la señal, obteniendo un resultado más suavizado. Por otro lado, también se requiere un alto grado de ajuste con la deformación esperada del contorno. Esto se comprueba a partir del coeficiente de correlación lineal (r) de Pearson [12], calculado localmente en la transición de la desviación generada en la pieza test, dónde m_x es la media del vector x (deformada esperada) y de forma análoga para el vector de puntos y (señal filtrada).

$$r = \frac{\sum(x - m_x)(y - m_y)}{\sqrt{\sum(x - m_x)^2 \sum(y - m_y)^2}} \quad (17)$$

Los resultados de la Figura 8 muestran un mejor filtrado cuando se emplea un polinomio de orden 3 y un tamaño de ventana de 51 puntos, para el caso de la pieza test empleada en este trabajo.

3. Resultados

La metodología desarrollada previamente para el procesamiento de imágenes se ha aplicado en la pieza test representativa del caso real. La pieza no sólo cuenta con rebabas, sino que ha sido diseñada con unas deformaciones con respecto al diseño original para simular las condiciones del proceso de fundición. En concreto, cuenta con media parte del contorno sobredimensionado con una demasía de +1mm, mientras que en el lado opuesto se presenta una contracción exagerada de material por valor de -1mm.

Siguiendo el planteamiento de la metodología descrita en este trabajo, se empieza por realizar la calibración de la cámara seleccionada en base a los requisitos para la pieza, fijando la distancia focal y la separación. Una vez posicionada la pieza en la zona de trabajo, se ajustan los parámetros de segmentación en base a las condiciones de iluminación y destellos generados sobre la pieza. Por último, se ajusta el tamaño del elemento estructural en base al tipo de rebabas esperadas, y se ajustan los parámetros de filtrado según la morfología de las deformaciones generadas en el proceso de fundición. De esta manera, se generan las condiciones para la captación del resto de piezas que se fabriquen a continuación. El método descrito tan sólo requiere un posicionamiento previo del corte del planeado y el agujero interior taladrado en base a un sistema de referencia para la pieza, lo que reduce sensiblemente el tiempo de operación requerido.

Finalmente, el postprocesamiento de la imagen obtenida permite obtener un contorno desviado como el de la Figura 9, en el que se aprecian las desviaciones específicamente diseñadas, que se combina con el sistema de referencia generado durante el palpado previo para asociarlo a las coordenadas globales del robot.

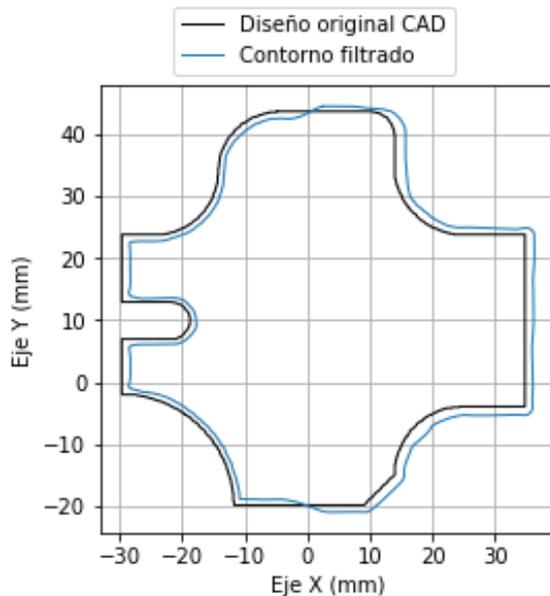


Figura 9. Resultados obtenidos sobre pieza test con desviaciones.

4. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos para la metodología desarrollada, pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- El procesamiento de imágenes permite identificar las desviaciones generadas en el proceso de fundición, posibilitando un mecanizado homogéneo de las aristas de las piezas. Para poder aplicar esta tecnología, se requiere trabajar sobre piezas planas que dispongan de una característica geométrica conocida para el escalado de la imagen.
- Las distorsiones propias de la lente se corrigen por medio de la calibración de la cámara con un patrón definido. Para minimizar el efecto de la distorsión propia de la perspectiva, se emplea una proyección ortográfica situando la cámara frontal a la pieza a una distancia de separación suficiente.
- El método empleado para la binarización de imágenes en la detección de aristas debe particularizarse en base a las condiciones de iluminación de la máquina donde se va situar

la pieza de trabajo. Los métodos globales son más inmediatos, mientras que los locales ofrecen mejores resultados ante condiciones desfavorables, aunque sus parámetros son más complicados de obtener.

- La precisión del sistema de captación por imágenes depende en gran medida del equipo utilizado y la distancia de separación. Las imágenes con un alto valor de exposición permiten definir mejor los píxeles en la zona de transición sobre las aristas de la pieza.
- El filtrado de las rebabas se realiza en dos etapas. Con las operaciones morfológicas, se elimina la mayor cantidad de material saliente, mientras que los filtros aplicados sobre la señal de la desviación obtenida permiten suavizar el ruido restante.
- Los filtros de paso bajo son útiles para reducir el ruido de las rebabas, pero el suavizado de la señal puede afectar a la topología de la pieza. Butterworth es útil en piezas con amplias transiciones en las zonas deformadas, mientras que Savitzky-Golay se ajusta mejor ante desviaciones pronunciadas.
- En su configuración, el ajuste mediante polinomios de orden reducido ayuda a reducir el ruido, a costa de un peor ajuste con la forma de la pieza. Un tamaño de ventana de puntos inferior mejora este ajuste, pero disminuye el efecto del filtrado del ruido de la señal.

De esta manera, el planteamiento seguido en este trabajo se puede adaptar a todo tipo de deformaciones, bajo diferentes condiciones de iluminación. Se trata de un método de captación más rápido que el palpado individual de puntos, empleando una única cámara de fotos, más barata en comparación con los equipos de medición 3D, y fácil de implementar en cualquier línea robotizada.

5. Agradecimientos

Esta publicación se enmarca dentro de la unidad AIMS (Artificial Intelligent Manufacturing for Sustainability) de la Universidad del País Vasco, como parte del proyecto ITENEO, de la convocatoria PID2019-109340RB-I00 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Los autores agradecen al programa HAZITEK del Departamento de Desarrollo Económico e Infraestructuras del Gobierno Vasco y a los fondos FEDER, a través del proyecto FAKTORIA. Por último, se reconoce también al grupo IT 573-22 del Gobierno Vasco.

6. Referencias

- [1] A. Rodríguez, M. González, O. Pereira et al. “Edge finishing of large turbine casings using defined multi-edge and abrasive tools in automated cells”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021. doi: 10.1007/s00170-021-08087-y
- [2] A. Mordvintsev, K. Abid. “Camera Calibration using OpenCV”, 2013 [en línea]. Disponible: <https://learnopencv.com/camera-calibration-using-opencv/>
- [3] Z. Zhang. “A Flexible New Technique for Camera Calibration”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, n.º 11, pp. 1330-1334, 2000. doi: 10.1109/34.888718
- [4] Y. Ma, S. Soatto, J. Kosecka, S.S. Sastry. “An Invitation to 3-D Vision: From Images to Geometric Models”. *Interdisciplinary Applied Mathematics*, 2003. ISBN: 978-0387008936
- [5] M. Hu. “Visual pattern recognition by moment invariants”, *IRE Transactions on Information Theory*, vol. 8, n.º 2, pp. 179-187, 1962, doi: 10.1109/TIT.1962.1057692
- [6] N. Otsu. “A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, n.º 1, pp. 62-66, 1979. doi: 10.1109/TSMC.1979.4310076
- [7] N.J. Sauvola, M. Pietikäinen. “Adaptive document image binarization”, *Pattern Recognition*, vol. 33, n.º 2, pp. 225-236, 2000. ISSN 0031-3203
- [8] A. Jain. “Fundamentals of Digital Image Processing”, *Prentice-Hall*, p 384, 1986. ISBN: 0-13-336165-9
- [9] S. Butterworth. "On the Theory of Filter Amplifiers", *Experimental Wireless and the Wireless Engineer*, vol. 7, pp. 536–541, 1930.
- [10] A. Savitzky, M.J.E. Golay. “Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures”, *Analytical Chemistry*, vol. 36, n.º 8, pp. 1627-1639, 1964. doi: 10.1021/ac60214a047
- [11] M. Welvaert, Y. Rosseel. “On the Definition of Signal-To-Noise Ratio and Contrast-To-Noise Ratio for fMRI Data”, *PLOS ONE*, vol. 8, n.º 11, 2013. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077089>
- [12] J.Rodgers, A. Nicewander. “Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient”, *American Statistician*. vol. 42, n.º 1, pp. 59-66, 1988. doi: 10.1080/00031305.1988.10475524