

DetECCIÓN DE CONTORNOS A PARTIR DE NUBES DE PUNTOS EN PIEZAS OBTENIDAS MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA

Pablo Zapico-García¹, Fernando Peña-Cambón¹, Gonzalo Valiño-Riestra¹, José Carlos Rico-Fernández¹

¹Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación, Universidad de Oviedo, España.
Email: zapicopablo@uniovi.es, penafernando@uniovi.es, gvr@uniovi.es, jcarlosr@uniovi.es

Resumen

A pesar de las ventajas que ofrece la fabricación aditiva, su aplicabilidad a nivel industrial sigue limitada por problemas en la calidad de las piezas. El hecho de que existan múltiples factores que afectan a esta calidad, ha hecho que muchos investigadores propongan métodos de inspección de capa *in-situ* con el objeto de mejorar la calidad en futuras fabricaciones. En el caso de utilizar sensores que proporcionan nubes de puntos, no existe un marco común de procesamiento que permita determinar el contorno real de la capa a partir de la información digitalizada, como sí ocurre en los sensores que capturan imágenes. Por ello, en este trabajo se presenta un procedimiento de procesamiento de nubes de puntos obtenidas mediante digitalizado de capas de fabricación aditiva basado en algoritmos de detección de contorno utilizados en imágenes. Los resultados alcanzados con este procedimiento son validados frente a una máquina de medición por coordenadas.

Palabras clave: detección de contornos; nubes de puntos; tratamiento de imágenes; fabricación aditiva.

Abstract

Despite the advantages of additive manufacturing, its industrial applicability is still limited by quality issues of the parts. The fact that there exist multiple factors that affect this quality has led many researchers to propose *in-situ* layerwise inspection in order to improve the quality in future manufacturing. In the case of using sensors that provide point clouds, there is no common framework to determine the actual contour of the layer from the digitized information, as is the case for sensors that capture images. Therefore, this paper presents a procedure for processing point clouds gathered by digitalization of additively manufactured layers based on the use of edge detection algorithms used in images. The results achieved with this procedure are validated against a coordinate measuring machine.

Keywords: contour detection; point clouds; image processing; additive manufacturing.

1. Introducción

El paradigma de la fabricación se ha visto alterado desde que surgió la Fabricación Aditiva (FA) debido a las numerosas ventajas que aporta frente a otras tecnologías de fabricación convencionales, tales como la alta personalización en lotes pequeños, la producción directa a partir de los modelos digitales de las piezas, la agilidad al compartir la información para la fabricación, el ahorro de material que conlleva o la versatilidad en las geometrías que permite producir [1]. Sin embargo, el uso de esta tecnología en el ámbito industrial se encuentra limitado, entre otras causas, por falta de precisión dimensional y geométrica que

garantice unos mínimos de calidad en las piezas. Por este motivo, muchas investigaciones han volcado sus esfuerzos en tratar de solventar los defectos que aparecen durante el proceso de fabricación [2], los cuales pueden deberse tanto a características del proceso FA o del material utilizados, como a errores específicos de la máquina de fabricación utilizada en cada caso [3].

Los enfoques aplicados para atajar estos problemas de calidad se pueden clasificar en tres tipos de estrategias: *correctivas*, *predictivas*, *proactivas*. Las *correctivas* se basan en corregir la calidad de las piezas fabricadas mediante algún tipo de postprocesado. Las *predictivas*

analizan la calidad de piezas específicas con el objetivo de solucionar los problemas observados en fabricaciones futuras de estas mismas piezas. Por último, las *proactivas* se fundamentan en caracterizar la influencia sobre la calidad de las piezas de diferentes parámetros de proceso, propiedades del material, así como errores de máquina, de modo que se puedan implementar modelos que permitan prevenir estas fallas en la calidad antes de realizar la fabricación. Las estrategias *proactivas* permiten mejorar la calidad final en piezas que no se hayan fabricado hasta el momento.

Los métodos *correctivos*, aparte de que requieren de procedimientos y equipamiento para realizar los diferentes postprocesados, no siempre son aplicables debido a diversos factores de las piezas, tales como el material, el tamaño o su complejidad geométrica. De los que no requieren postprocesado, los métodos *proactivos* permiten evitar la fabricación de unidades de sacrificio, pero requieren del desarrollo de modelos específicos mediante la caracterización de diferentes piezas tipo artefacto. Aparte, estos métodos exigen una alta reproducibilidad del proceso FA, algo difícil de conseguir aún hoy en algunos casos. Por esta razón, en los últimos años los métodos *predictivos* han ganado relevancia en este ámbito.

Para aplicar métodos *predictivos* es imprescindible realizar la medición de una pieza de sacrificio. Esta medición se puede realizar durante [4] o después de la fabricación. Para hacerlo durante la fabricación es necesario contar con sistemas de medición integrados en máquina, sistemas *in-situ*. Al respecto, existen numerosos trabajos que proponen el uso de diversos tipos de sensores para digitalizar la última capa fabricada [5], tales como cámaras fotográficas digitales, sensores de imagen por contacto, sensores de triangulación láser, sensores de holografía conoscópica, etc. En función del tipo de sensor utilizado, es necesario realizar diferente tratamiento de la información capturada por éste para convertirla en información metrológica del contorno de la capa digitalizada, ya que este contorno materializará la superficie exterior de la pieza. En el caso de sensores que capturen imágenes, desde hace años son bien conocidos diferentes algoritmos de procesamiento, basados en el gradiente de escala de grises, que permiten determinar el contorno de uno o más objetos presentes en la imagen [6]. Por otro lado, en el caso de sensores que capturen nubes de puntos, la obtención del contorno requiere de un procesamiento prácticamente específico al tipo de sensor por no existir procedimientos establecidos similares a los extendidos en el campo de las imágenes. Si bien esto no implica que estos sensores no se puedan utilizar, dificulta su aplicación y perjudica la reproducibilidad de los resultados que se pueden alcanzar debido a la falta de un marco común en cuanto a rutinas y algoritmos de procesamiento.

En este trabajo se propone un método de procesamiento de nubes de puntos obtenidas de capas de FA que permite determinar la desviación general de estas capas respecto a sus respectivas geometrías nominales. Esta desviación general permite desarrollar métodos correctivos, predictivos o proactivos para mejorar la calidad de piezas. El método desarrollado se basa en convertir las nubes de puntos a imágenes para utilizar diferentes algoritmos de detección de contornos aplicables a este formato de información. Esto permite establecer un marco común de detección de contorno para nubes de puntos independientemente del sensor utilizado para su captura. Para validar el método propuesto se comparan los resultados alcanzados al aplicarlo a las nubes de puntos capturadas con un sensor de triangulación láser de cortina sobre una pieza FA, con los resultados obtenidos sobre esta misma pieza utilizando el sistema de medición por contacto de una Máquina de Medición por Coordenadas (MMC). Los resultados alcanzados validan el método propuesto para el caso de los algoritmos de procesamiento de imágenes *Binarization* y *Canny*.

2. Materiales

Como máquina FA se utilizó un banco de ensayos desarrollado por el grupo de investigación *IPF Research* de la Universidad de Oviedo [7]. Además de contar con un sistema FA que fabrica utilizando el proceso de Extrusión de Material (EM), este banco cuenta con un puente de inspección en el que se pueden montar diferentes tipos de sensores de digitalizado permitiendo moverlos en el plano horizontal mediante los ejes de inspección UV (Figura 1). En este trabajo se utilizó para el digitalizado un sensor de triangulación de cortina láser Gocator 2410 del fabricante *LMI Technologies*. Las principales características de este sensor se muestran en la Tabla 1.

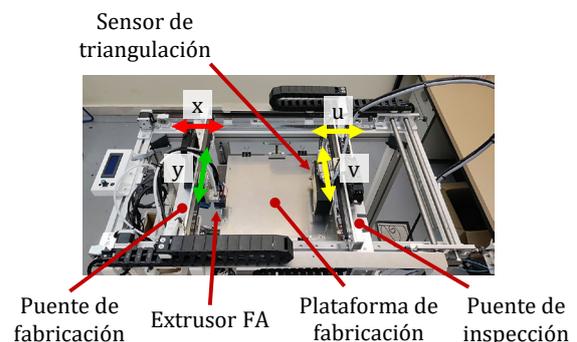


Figura 1. Banco de ensayos y sensor utilizados.

Con el fin de expresar la información capturada por el sensor en el sistema de coordenadas de fabricación, es decir, en el sistema Pieza (OXYZ), se realizó una calibración extrínseca del sensor que permite convertir su lectura, junto con la posición de los ejes UV en la

que haya sido adquirida, en una nube de puntos expresada en dicho sistema de coordenadas.

Tabla 1. Principales características de Gocator 2410 [8].

	Unidades	Valor
Cadencia de captura	Hz	200 – 5000
Rango de medida (RM)	mm	6
Puntos por perfil	Puntos	1710
Densidad de perfil	µm/punto	5,8 – 6,2
Longitud de perfil	mm	9,92 – 10,60
Repetibilidad*	µm	0,2
Linealidad*	±% RM	0,015

*En dirección del rango de medida

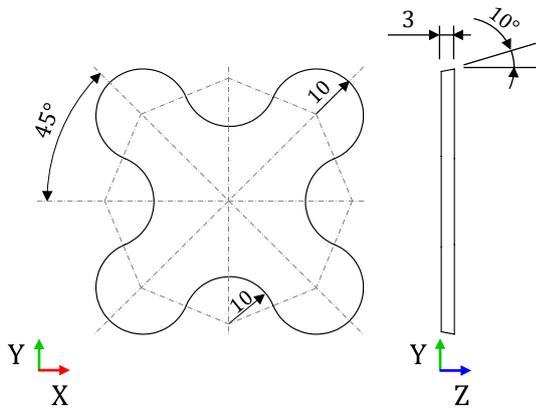


Figura 2. Esquema y dimensiones de la pieza analizada.

Como pieza de ensayo se utilizó la mostrada en la Figura 2. Se fabricó en PLA blanco del suministrador BCN3D utilizando como principales parámetros del proceso EM: altura de capa 0,1 mm, porcentaje de relleno 20%, espesor de pared 1,2 mm, espesor de última capa 0,8 mm. Una vez fabricada la pieza, se digitalizó su última capa con el sensor de triangulación siguiendo una trayectoria en zig-zag con un 30% de solape de la cortina láser entre pasadas (Figura 3). En este digitalizado se capturaron cortinas separadas 0,01 mm en el eje Y, cuya resolución media fue de 6,2 µm/punto.

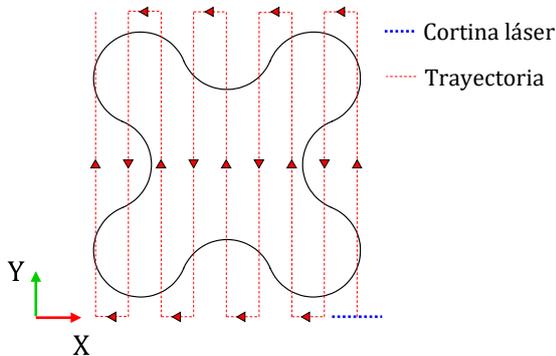


Figura 3. Estrategia de digitalizado en zig-zag.

Tras el digitalizado con el sensor de triangulación, la pieza se midió en una MMC DEA Global Image utilizando un palpador cilíndrico de 2 mm de diámetro montado en el cabezal PH10-MQ SP25M del fabricante *Renishaw*. Las prestaciones metrológicas de esta máquina se presentan en (1) y (2).

$$R_{0,MPL} = 2.2 \text{ µm} \tag{1}$$

$$E_{0,MPE} = 2.2 + 3L \cdot 10^{-3} \text{ µm, } L \text{ en mm} \tag{2}$$

Nótese que la geometría troncocónica invertida de la pieza de ensayo asegura que el palpador cilíndrico de la MMC digitalice la última capa sin colisionar con capas anteriores (Figura 4). Si bien esta característica geométrica especial de la pieza de ensayo no es indispensable en piezas de FA, permite en este estudio validar los resultados obtenidos con el sensor de triangulación comparándolos con los resultados de medición de la MMC.

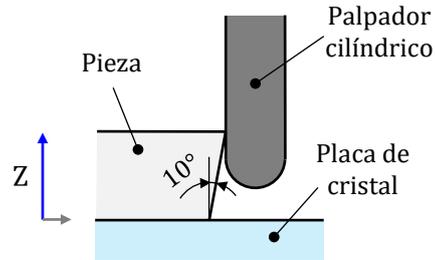


Figura 4. Esquema de medición de contorno de última capa con palpador cilíndrico.

En cuanto al apartado de software, para el funcionamiento y control del banco de ensayos y del sensor de triangulación se utilizó tanto software libre, Marlin 1.1.9, CuraEngine 4.8.0, Arduino, como bibliotecas específicas desarrolladas por el fabricante del sensor en el lenguaje de programación VB.NET. En el caso de la MMC, se utilizó el software de asistencia a la inspección PC-DMIS v2015.1. Para procesar la información digitalizada con ambos sistemas y convertirla en información de contorno se utilizaron diferentes rutinas implementadas en Matlab, algunas de ellas de desarrollo propio y otras específicas del *Image Processing toolbox*.

3. Métodos

El método de procesamiento para convertir la nube de puntos capturada con el sensor de triangulación (Figura 5) en información de contorno de pieza contempla tres fases:

- Preprocesado de la nube.
- Detección del contorno a partir de la imagen.
- Obtención del contorno final.

En primer lugar, el *preprocesado de la nube* permite eliminar puntos espurios digitalizados por el sensor de triangulación, los cuales se deben a defectos en la medida derivados de diversos factores como reflejos ópticos de la cortina láser. Para ello, se realiza un análisis bimodal de las coordenadas Z asociadas a cada punto. Dada la altura de la pieza y el rango de medida del sensor (Figura 2, Tabla 1), de este análisis se obtienen sendos valores medios y dispersiones para los puntos que representan las superficies de la placa de cristal y de la última capa de la pieza analizada. Esta información se utiliza para descartar aquellos puntos de la nube por debajo de la base o por encima de la capa con un margen de distancia en Z de 0,25 mm. En el supuesto de que la pieza no contase con una geometría troncocónica invertida, este análisis debería centrarse en discriminar la capa digitalizada de la base o de las capas anteriores.

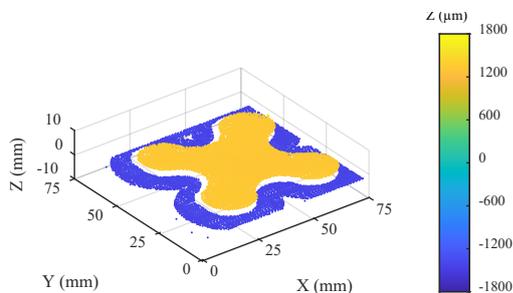


Figura 5. Nube de puntos digitalizada, aligerada al 0,05%.

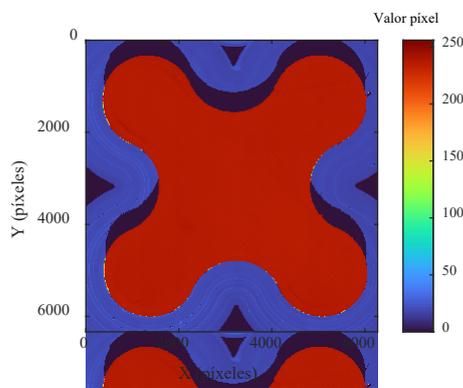


Figura 6. Imagen en escala 0-255 obtenida a partir de nube de puntos.

La *nube de puntos preprocesada* se utiliza a continuación para la *detección del contorno a partir de la imagen*. En primer lugar, se convierte la nube de puntos a una imagen o mapa de bits utilizando la resolución de rejilla deseada. En este trabajo 0,01 mm. Para ello se define una rejilla de píxeles de este tamaño que cubre la nube de puntos en el plano horizontal, asignando a cada píxel el valor medio de Z de los puntos abarcados por éste [9]. A los píxeles que no alcanzan ningún punto de la nube no se les asigna ningún valor numérico. Tras esto, se normalizan los

valores de Z al intervalo 0-255, obteniendo una imagen en mapa de bits (Figura 6). A continuación, se aplica el algoritmo de detección de contorno deseado, por ejemplo, *Binarization*, *Canny*, *Roberts*, *Sobel* o *Prewitt*. Estos algoritmos proporcionan imágenes binarias en las que están señalados aquellos píxeles detectados como parte de algún contorno. Las posiciones 2D de los píxeles del contorno detectados se revierten posteriormente a coordenadas en el plano horizontal formando el *contorno detectado* (Figura 7).

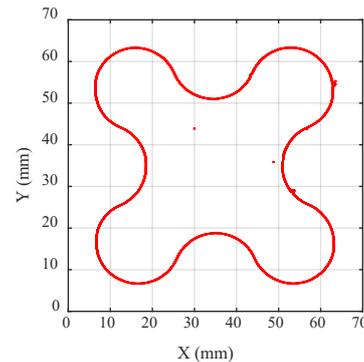


Figura 7. Representación de los puntos del *contorno detectado* (utilizando algoritmo *Binarization*).

Como características del *contorno detectado* destacan que está definido por puntos sin un orden particular, que puede contener contornos secundarios no pertenecientes al contorno de la capa analizada, que puede presentar tanto huecos como defectos locales, aparte de que puede mostrar ruido de baja longitud de onda no presente en el perfil real de la capa. El desorden de los puntos se debe a que éstos provienen de la estructura matricial de la imagen, la cual no está relacionada con el concepto de recorrido secuencial del contorno de la capa. Respecto a los posibles contornos secundarios, pueden deberse a que otras zonas del digitalizado diferentes al contorno de la capa hayan alcanzado los criterios establecidos por el algoritmo de detección de contorno. Estos contornos secundarios, que típicamente pertenecen a zonas interiores de la capa, se deben descartar si se desea analizar el contorno de ésta. En cuanto a los posibles huecos, se deben a que el algoritmo de detección no haya conseguido discriminar alguna parte del contorno por no alcanzar su digitalizado los criterios establecidos por este algoritmo. Por su parte, los defectos locales (Figura 8a) pueden deberse a fenómenos característicos del propio proceso de fabricación. En el caso de la pieza analizada, dadas las características del proceso de EM, en el contorno de las capas se pueden producir defectos locales de tipo *stringing* [10]. La posible aparición de estos defectos, así como su localización, no dependen únicamente del diseño de la pieza fabricada ni de los parámetros habituales del proceso EM, sino de la planificación de las trayectorias del extrusor generada por el software de asistencia a la fabricación que se utilice en cada caso. Por último, el ruido de baja

longitud de onda acoplado al perfil digitalizado es típico de fluctuaciones de la medida del sensor en el plano horizontal debidas al ruido característico de este tipo de sensores sin contacto (Figura 8b), así como a errores cordales producidos por movimientos interpolados en el plano horizontal del elemento que conforma la pieza (extrusor de material en el proceso EM).

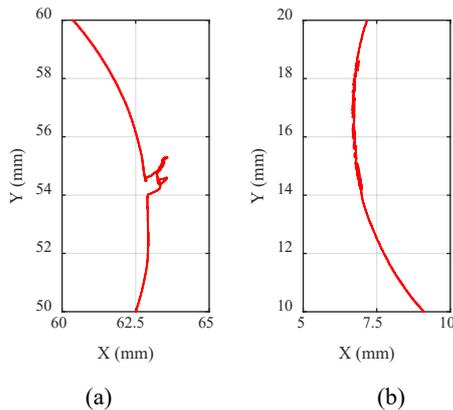


Figura 8. Ejemplos de defectos en el contorno principal: (a) *stringing* derivado del proceso FA, (b) ruido del sensor.

Considerando que el fin de realizar el procesamiento propuesto en este trabajo es detectar la desviación general de capas de FA con el fin de aplicar o desarrollar métodos que mejoren su calidad dimensional y geométrica, el *contorno detectado* debe ser tratado para *obtener un contorno final* libre de contornos secundarios, huecos y defectos locales, aparte de suavizado. Para conseguir esto, en primer lugar, el procedimiento propuesto ordena los puntos del *contorno principal* en secuencia que recorra este contorno. Si bien es cierto que existen métodos registrados que permiten realizar este ordenamiento [11], éstos muestran problemas con geometrías de contorno de capa que combinan tramos cóncavos y convexos, tal como la pieza analizada en este trabajo. Por tanto, se decidió desarrollar un método propio que evita estos problemas. Este método requiere contar con puntos del contorno nominal de la capa estudiada en cada caso, los cuales se pueden obtener del software de rebanado utilizado. Tras realizar una alineación de los puntos del contorno nominal con los puntos del *contorno detectado* mediante algún método de alineación de puntos en el plano, tal como *Principal Component Analysis*, *Iterative Closest Point* o *Singular Value Decomposition*, se realiza un análisis de los puntos del contorno nominal con el fin de detectar tramos cóncavos y convexos en el mismo. Este análisis se basa en el gradiente del ángulo formado entre puntos sucesivos de este contorno. Una vez clasificadas los tramos como cóncavos o convexos se determina para cada uno de ellos un *punto de pivote* en la posición intermedia de los *puntos inicio* y *fin* del contorno

nominal pertenecientes a dicho tramo, así como la orientación de los *segmentos* que unen este punto pivote con estos otros dos (Figura 9). Los *puntos pivote* y estas orientaciones son utilizadas a continuación para ordenar el listado de puntos del *contorno detectado* analizando secuencialmente los diferentes tramos.

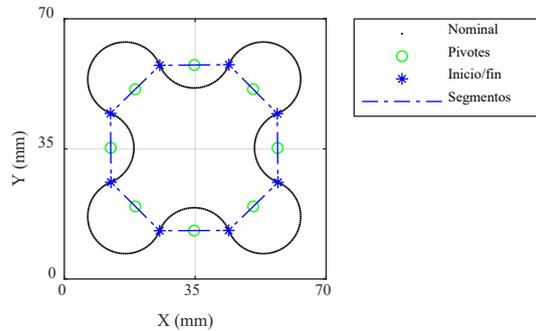


Figura 9. Detección de tramos cóncavos/convexos y puntos para ordenación.

Para cada tramo se determina la distancia de los puntos del contorno detectado al *punto pivote* asociado a éste, así como la orientación de cada segmento que los une. Finalmente, se disponen en orden creciente angular los puntos cuya distancia al *punto pivote* se encuentra dentro de una cierta tolerancia radial y cuya orientación de segmento que lo une al *punto pivote* se encuentre dentro de la horquilla angular definida entre el segmento de inicio y de fin (Figura 10). De este modo se descartan puntos pertenecientes a contornos secundarios, así como a otros tramos del contorno. Aparte, también se descartan puntos que hayan sido ordenados anteriormente como parte de otros tramos. La citada tolerancia se define con una proporción de la distancia media de los puntos teóricos del contorno al *punto pivote*. En este trabajo 30%.

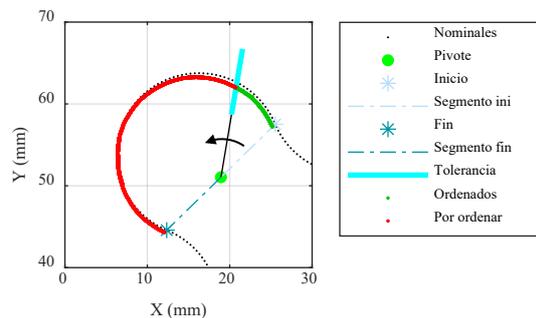


Figura 10. Ordenación de los puntos de uno de los tramos convexos de la pieza.

Una vez ordenados los puntos del *contorno detectado*, se realiza un filtrado de los mismos basado en el gradiente del ángulo detectado entre estos puntos sucesivos del contorno. Este filtro, que utiliza un umbral respecto a la dispersión del valor gradiente

angular a lo largo del *perfil detectado*, consigue eliminar las zonas en las que existe algún tipo de defecto local, así como ruidos de baja longitud de onda (Figura 8). Tras eliminar estas zonas, el perfil presenta huecos y aún puede presentar ruido de baja longitud de onda (Figura 11). Gracias a que los puntos están ordenados según el contorno, el cierre de huecos se realiza con interpolaciones basadas en *splines* cúbicos, mientras que el suavizado se consigue con un filtro de Savitzky-Golay [12]. Tanto el cierre de huecos como el suavizado se podrían llevar a cabo aplicando otros métodos que aprovechen el ordenamiento de los puntos realizado. Tras este procesamiento se obtiene el *contorno final* (Figura 12).

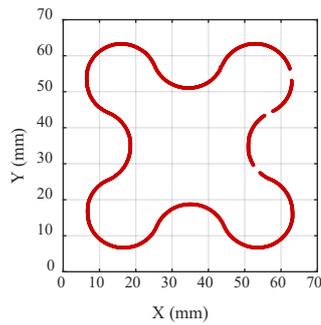


Figura 11. Contorno detectado sin defectos locales.

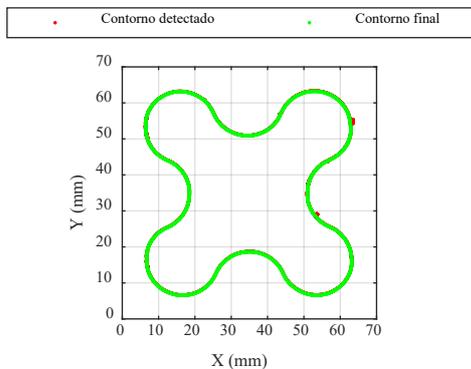
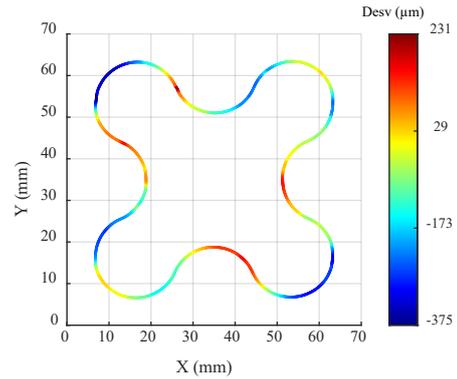
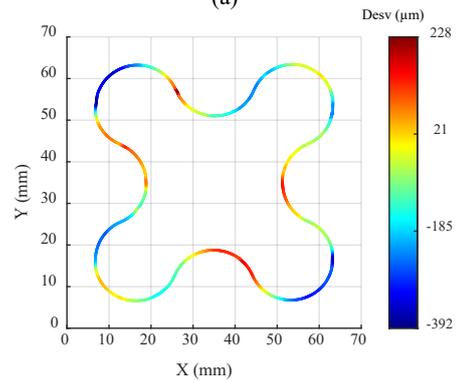


Figura 12. Comparativa entre *contorno detectado* y *contorno final*.

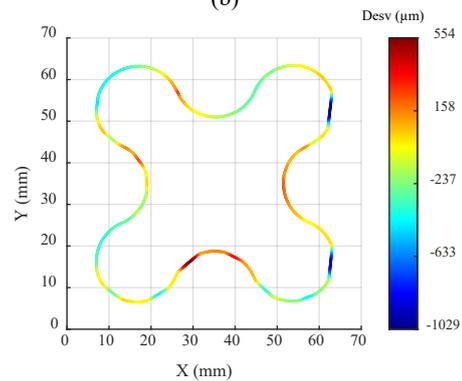
Con el fin de valorar la bondad de detección del contorno real de la capa analizada, se compararon los resultados alcanzados utilizando el procedimiento propuesto, y aplicando diferentes algoritmos de detección de contorno (*Binarization*, *Canny*, *Sobel*), con los resultados obtenidos con la MMC en la medición de esta capa. Esta medición se realizó con un proceso de palpado continuo utilizando una densidad de puntos de 25 puntos/mm. A esta medición se le aplicó un filtrado de defectos locales y suavizado, análogos a los descritos para el procedimiento, si bien es cierto que este contorno obtenido en la MMC presenta menos problemas que el digitalizado con el sensor de triangulación.



(a)



(b)



(c)

Figura 13. Desviaciones detectadas con sensor de triangulación y diferentes algoritmos de detección de contorno: (a) *Binarization*, (b) *Canny*, (c) *Roberts*.

4. Resultados y discusión

En la Figura 13 se muestran las desviaciones detectadas con el sensor de triangulación aplicando el método de procesamiento descrito anteriormente con diferentes tipos de algoritmos de detección de contorno en imagen. Como se puede observar, los resultados obtenidos con los diferentes algoritmos son similares, si bien el método *Roberts* (Figura 13c) muestra problemas localizados debido a que el *contorno detectado* con éste presenta huecos de gran tamaño para los que el cierre basado en *splines* no consigue una interpolación satisfactoria. Por ello, a partir de este punto se descartan los resultados alcanzados con este algoritmo. Comparando los resultados de los algoritmos *Binarization* y *Canny* (Figura 13 a y b) con

los obtenidos con la MMC (Figura 14) se observa una gran similitud, tanto en localización de las desviaciones como en su magnitud (Figura 15).

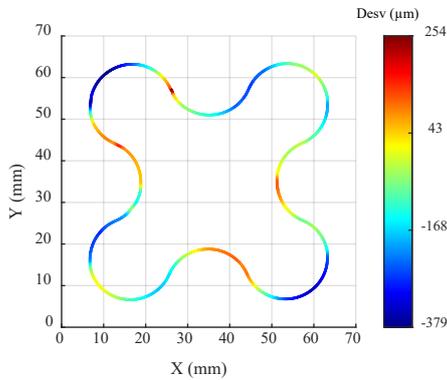


Figura 14. Desviaciones detectadas con la MMC.

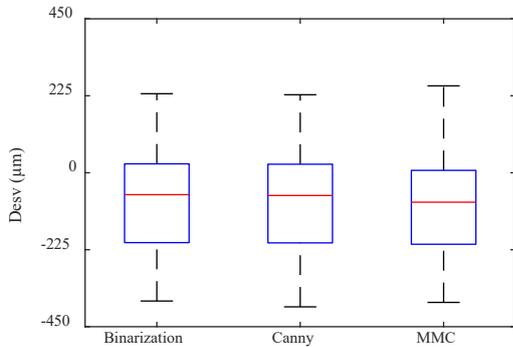


Figura 15. Comparativa de las desviaciones detectadas con el sensor de triangulación y con la MMC.

En la Tabla 2 se resumen estas desviaciones en términos de valores mínimo, máximo y medio, así como en términos de dispersión. A pesar de que existen ligeras diferencias en los valores extremos y medios, considerando las dispersiones observadas en todos los casos, se puede decir que los resultados obtenidos en todos ellos son prácticamente equivalentes. Como se puede observar, los tres métodos alcanzan valores similares de desviación, siendo ésta negativa en términos generales, lo que se relaciona con la contracción sufrida por el material que es característica del proceso EM.

Tabla 2. Resultados de desviaciones para los algoritmos utilizados y para la MMC.

Método	Min	Max	Medio	σ
	μm			
Binarization	-375	231	-81,2	135,2
Canny	-392	228	-82,5	134,5
MMC	-379	254	-97,8	135,0

5. Conclusiones

En este trabajo se propone un método de procesamiento de nubes de puntos obtenidas por digitalizado sin contacto de capas en piezas FA que permite determinar las desviaciones de estas capas respecto a su geometría nominal. Este método se basa en convertir la nube de puntos en una imagen para aplicar algoritmos de detección de contorno sobre imágenes. Lo que, además de aprovechar el demostrado potencial de este tipo de algoritmos, permite establecer un marco común de procesamiento de las nubes de puntos obtenidas sobre capas FA independientemente del sensor de digitalizado utilizado.

El método de procesamiento propuesto contempla tres fases:

- Preprocesado de la nube para eliminar puntos espurios típicos de los digitalizados con sensores ópticos obteniendo la *nube de puntos preprocesada*.
- Detección de contorno, previa conversión a imagen de la nube de puntos, basado en la aplicación de algún algoritmo de detección de contorno tal como *Binarization*, *Canny*, *Roberts* o *Sobel*, para obtener el *contorno detectado*.
- Obtención del *contorno final* mediante la ordenación de los puntos en secuencia del contorno de la capa, el filtrado de defectos locales específicos del proceso EM, el cierre de huecos por interpolación y el suavizado del perfil mediante filtro tipo Savitzky-Golay.

La propuesta de detección de contorno mediante algoritmos de procesamiento de imágenes, así como el método para ordenación y filtrado de los puntos del *contorno detectado* son innovaciones de este trabajo. El método de procesamiento ha sido validado al constatar la gran similitud de los resultados obtenidos con el mismo para el caso de los algoritmos de procesamiento *Binarization* y *Canny*, sobre la última capa de una pieza FA obtenida mediante EM, en comparación con la medición con una MMC. En el caso del algoritmo *Roberts*, debería implementarse otro método de interpolación para cierre de huecos en el contorno filtrado o deberían modificarse las condiciones de contorno del propio algoritmo.

Como trabajos futuros se planea utilizar las desviaciones detectadas en la capa de la pieza de estudio para implementar métodos predictivos que permitan compensar estas desviaciones en futuras fabricaciones, en la medida que la reproducibilidad del proceso EM lo permita. Asimismo, se planea utilizar otros sensores de digitalizado sin contacto, tales como sensores de Holografía Conoscópica, para aplicar este mismo procedimiento.

6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad y FEDER (DPI2017-83068-P).

7. Referencias

- [1] S. Ford, M. Despeisse. “Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges”. *Journal of cleaner Production*, vol. 137, pp. 1573-1587, 2016.
- [2] S. A. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O’Donoghue, C. Charitidis. “Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities”. *Materials today*, vol. 21, n° 1, pp. 22-37, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>
- [3] H. Vanaei, M. Shirinbayan, M. Deligant, K. Raissi, J. Fitoussi, S. Khelladi, A. Tcharkhtchi. “Influence of process parameters on thermal and mechanical properties of polylactic acid fabricated by fused filament fabrication”, *Polymer Engineering & Science*, vol. 60, n° 8, pp.1822–1831, 2020. <https://doi.org/10.1002/pen.25419>.
- [4] M. Mani, S. Feng, B. Lane, A. Donmez, S. Moylan, R. Fesperman. “Measurement science needs for real-time control of additive manufacturing powder bed fusion processes”, 2015 [PDF]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.IR.8036>
- [5] P. Charalampous, I. Kostavelis, D. Tzovaras. “Non-destructive quality control methods in additive manufacturing: a survey”. *Rapid Prototyping Journal*, vol. 26, n° 4, pp. 777-790, 2020. 10.1108/RPJ-08-2019-0224
- [6] R. C. González, R. E. Woods, S. L. Eddins. “Digital image processing using Matlab”, Gatesmark Publishing, ISBN 978-0-9820854-0-0, 2009.
- [7] F. Peña, C. Fernández, G. Valiño, B. J. Álvarez, J. C. Rico. “Design and construction of a test bench for the manufacture and on-machine non-contact inspection of parts obtained by Fused Filament Fabrication”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1193, n° 1, p. 012090, 2021. 10.1088/1757-899X/1193/1/012090
- [8] LMI Technologies. “Gocator 2400 Series, 3D smart line profile sensors”, Ver. US-1.2, 2022.
- [9] B. Guan, S. Lin, R. Wang, F. Zhou, X. Luo, Y. Zheng. “Voxel-based quadrilateral mesh generation from point cloud. *Multimedia Tools and Applications*”, vol. 79, n° 29, pp. 20561-20578, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-08923-5>
- [10] M. S. S. Haque. “Minimizing Stringing Issues In FDM Printing”, 2020.
- [11] Huang. “3D printing shrinkage compensation using radial and Angular layer perimeter point Information”, United States Patent, US 9,886,526 B2, 2018.
- [12] R. W. Schafer. “What is a Savitzky-Golay filter? [lecture notes]”. *IEEE Signal processing magazine*, vol. 28, n° 4, pp. 111-117, 2011.