

Jornadas de Automática

Decapado láser continuo con adaptación morfológica 3D al vuelo

Javier Gamir^{a,*}, Carlos Ricolfe^a

^a*Instituto de Automática e Informática Industrial (ai2), Camino de Vera s/n, Edificio 8G, Acceso D, planta 4ª, 46022 Valencia, España.*

To cite this article: Gamir, J., Ricolfe, C. 2026. Continuous laser stripping with on-the-fly 3D morphological adaptation. *Jornadas de Automática*, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13681>

Resumen

El decapado láser en piezas de gran tamaño automotriz enfrenta retos por deformaciones morfológicas y errores de posicionamiento. Tradicionalmente, esto exige costosos utillajes y trayectorias ciegas sobre modelos CAD ideales, generando procesos rígidos. Este artículo presenta un novedoso sistema de decapado láser continuo (on-the-fly) que elimina la dependencia de utillajes de precisión mediante reconstrucción 3D in situ y adaptación morfológica. Para validar su robustez, se diseñó un escenario de estrés: proyectar la trayectoria de un CAD plano sobre una probeta plástica curva, exagerando las deformaciones de una calandra. Mediante un control sincronizado en tiempo real entre los ejes y el láser, la trayectoria se recalcula al vuelo. Los resultados demuestran que este control adaptativo se ajusta a la topografía real, manteniendo la distancia focal óptima. Esto asegura un ancho de surco homogéneo y su posición relativa exacta, corrigiendo el mecanizado tradicional en lazo abierto.

Palabras clave: Control en tiempo real, Control adaptativo, Planificación de trayectorias, Visión por computador, Sistemas de fabricación flexible.

Continuous laser stripping with on-the-fly 3D morphological adaptation

Abstract

Selective laser ablation in the automotive sector faces control challenges with large-format parts due to deformation and positioning errors. The industry currently relies on costly jigs and idealised CAD models, resulting in inflexible processes. This article presents a continuous (on-the-fly) laser ablation system that eliminates the reliance on precision jigs through in-situ 3D scanning and a morphological adaptation algorithm. To validate its robustness, a stress scenario was designed: the trajectory of a geometrically flat CAD model was adapted to a real curved plastic test specimen, exaggerating the deformations typical of a radiator grille. The system recalculates the trajectory on the fly through real-time synchronised control between the axes and the laser. The results demonstrate that the adaptive control maintains the optimal focal length and a uniform groove width, correcting the shortcomings of traditional machining and enabling integration into existing conveyor lines.

Keywords: Real-time control, Adaptive control, Trajectory planning, Computer vision, Flexible manufacturing systems.

1. Introducción

El procesamiento láser de componentes industriales de gran formato, como los empleados en el sector de la automoción, ha dependido tradicionalmente de metodologías de mecanizado de “paso y escaneo”. En este enfoque, la pieza de trabajo debe detenerse por completo para que el escáner galvánométrico opere en su campo de visión estático, lo que reduce

drásticamente la productividad y genera discontinuidades estructurales en los bordes, conocidas como errores de cosido (*stitching errors*) (Cui et al., 2021). Para optimizar la eficiencia y el tiempo de ciclo, la industria avanza hacia el procesamiento “al vuelo” (*on-the-fly*), que sincroniza el movimiento continuo de la pieza con la deflexión del escáner. Sin embargo, la gran mayoría de los componentes automotrices, como

*Autor para correspondencia: jgamart@upv.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

las calandras donde actualmente se demanda la ablación selectiva de pintura para crear zonas de retroiluminación estética, presentan geometrías tridimensionales complejas e irregulares. Los sistemas láser convencionales utilizan lentes F-Theta pasivas diseñadas para enfocar el haz de luz estrictamente sobre un plano bidimensional fijo (Zhu et al., 2023; Jiang et al., 2025). En consecuencia, cuando una pieza no plana se desplaza bajo el láser, cualquier variación topográfica en el eje Z provoca una pérdida inmediata de la distancia focal y de la densidad de energía ablativa.

Para superar las limitaciones ópticas y cinemáticas del procesamiento convencional, este trabajo propone un método de decapado láser continuo que integra la reconstrucción tridimensional y un control optomecatrónico sincronizado, lo que permite una adaptación absoluta a la morfología real de la pieza (Hoppe et al., 2025). El subsistema de reconstrucción emplea un láser de línea de luz estructurada y una cámara 2D (Munaro et al., 2015) que operan bajo un modelo de muestreo disparado por un *encoder* solidario al sistema de transporte continuo (Weyrich et al., 2012). Este mecanismo vincula de forma determinista cada imagen capturada a una posición longitudinal exacta, lo que permite reconstruir una nube de puntos 3D de alta fidelidad de la pieza en movimiento, y anticipar sus coordenadas espaciales exactas para la fase de actuación láser.

Frente a las costosas soluciones comerciales de alta gama, como los sistemas ORCA (Acsys), Laser P series (GF Machining) o TruLaser (TRUMPF), que operan predominantemente en celdas cerradas por lotes (ACSYS Lasertechnik GmbH, 2026; GF Machining Solutions, 2026; TRUMPF SE + Co. KG, 2026), este trabajo explora la viabilidad de una alternativa modular e *in-line*. Lejos de pretender presentar un sistema final de grado industrial, esta propuesta se centra en el desarrollo de un prototipo experimental que busca conciliar el procesamiento de alta precisión en piezas de morfología irregular (Ma et al., 2025) con la flexibilidad que demanda una línea de producción continua.

La arquitectura técnica planteada para este prototipo se fundamenta en la corrección geométrica *in situ* y la actuación adaptativa “al vuelo”. El proceso se basa en contrastar la reconstrucción 3D de la pieza con el modelo CAD original mediante el algoritmo ICP. Tras un alineamiento global inicial (Decker et al., 2020), se aplican iteraciones de ICP locales para mapear las deformaciones específicas. La ejecución del decapado se confía a un escáner galvanométrico 3D que, a diferencia de los sistemas de focalización pasiva, permite ajustar dinámicamente su eje Z en tiempo real para seguir la topografía real de la superficie (Dinh et al., 2023). Todo el proceso se sincroniza mediante un *encoder* que realimenta la posición longitudinal, permitiendo que el sistema opere de forma continua.

Finalmente, para poner a prueba el potencial de esta idea y demostrar su inmunidad ante discrepancias severas, la validación experimental se ha diseñado como un escenario de estrés superior al esperado en producción. En lugar de utilizar una pieza industrial estándar, el sistema se ve obligado a cotejar la reconstrucción tridimensional de una probeta plástica curva y redondeada por el proceso de impresión con un modelo CAD estrictamente plano y con bordes afilados. Este experimento busca demostrar que, al superar deformaciones muy por en-

cima de las tolerancias habituales de fabricación, el principio técnico propuesto no solo es válido, sino que también tiene una proyección prometedora para un desarrollo más robusto en el futuro de la fabricación flexible.

2. Descripción del sistema experimental

El banco de pruebas desarrollado para este estudio (Figura 1) ha sido diseñado para emular un entorno de producción de flujo continuo. El sistema se aleja de la arquitectura de “estación fija” para permitir el procesamiento de piezas de gran longitud mediante una configuración integrada de transporte y visión.

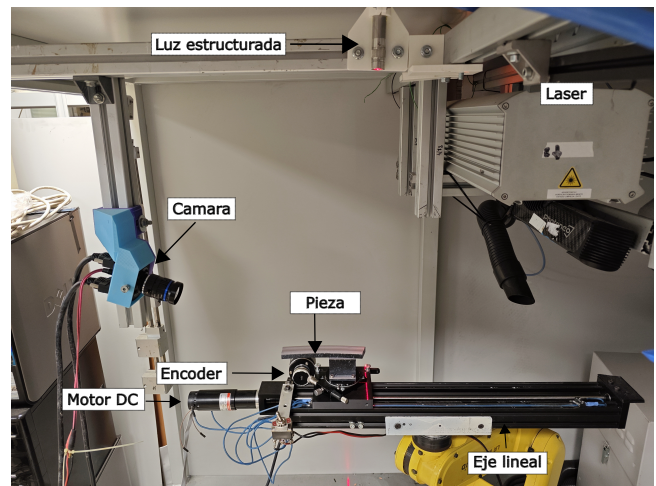


Figura 1: Vista general del banco de pruebas experimental del sistema de decapado láser continuo.

2.1. Configuración de Hardware y Sensores

La planta piloto se compone de tres pilares tecnológicos interconectados:

- **Sistema de transporte y odometría:** Un eje de transmisión lineal, accionado por un motor de corriente continua, desplaza la pieza. Solidario a este eje se encuentra un *encoder* incremental, que actúa como el sensor de referencia principal. Su función es doble: proporciona la base de tiempos espacial para el disparo de la cámara y aporta el dato de posición longitudinal indispensable para la reconstrucción geométrica.
- **Subsistema de digitalización 3D:** Formado por un láser de línea (luz estructurada) y una cámara 2D de alta velocidad. Este conjunto captura los perfiles transversales de la pieza. La integración de estos perfiles con las lecturas de posición del *encoder* permite reconstruir la nube de puntos 3D real de la calandra a medida que esta avanza.
- **Unidad de actuación láser:** Un cabezal láser de fibra con tecnología galvanométrica 3D. Este dispositivo recibe las coordenadas corregidas y ajusta dinámicamente sus espejos y su lente de enfoque (eje Z) para actuar sobre la pieza en movimiento.

2.2. Flujo de trabajo y sincronización

El proceso se divide en tres etapas críticas sincronizadas mediante el *encoder* incremental:

1. **Escaneado y reconstrucción:** El *encoder* dispara la captura de perfiles, vinculando cada imagen de la cámara con una posición longitudinal exacta para generar la nube de puntos 3D real.
2. **Adaptación morfológica:** El PC procesa la nube frente al CAD para corregir deformaciones locales y generar nuevas trayectorias de decapado (ver Sección 3).
3. **Ejecución sincronizada:** Una vez obtenidas las coordenadas en el sistema de coordenadas del láser, el PC utiliza la lectura del *encoder* para enviar la señal de disparo cuando la pieza alcanza la posición física de procesado. Simultáneamente, el *encoder* realimenta directamente a la tarjeta controladora del láser para compensar el desplazamiento del eje en tiempo real, aplicando un avance proporcional a la resolución de pulso configurada.

3. Algoritmo de adaptación morfológica

El objetivo central de este trabajo es la transición de una trayectoria ideal teórica a una trayectoria real adaptada. Para ello, se ha desarrollado un algoritmo basado en el registro iterativo por segmentos.

3.1. Alineamiento Global y Segmentación

El primer paso del procedimiento consiste en situar la nube de puntos reconstruida y el modelo CAD de referencia en un sistema de referencia común. Dado que se trabaja con un prototipo experimental donde el posicionamiento inicial puede variar, este proceso se ha estructurado en dos fases: un prealineamiento heurístico y un ajuste fino mediante el algoritmo Iterative Closest Point (ICP).

Para el alineamiento inicial, se aplica una transformación de traslación rígida basada en la envolvente geométrica de ambas nubes. El sistema calcula los valores máximos en los ejes X y Z, y el valor medio en el eje Y de las coordenadas de la reconstrucción y del modelo. Al igualar estos puntos críticos, se consigue una superposición macroscópica rápida que sitúa al algoritmo en una zona de convergencia segura, minimizando los errores de posicionamiento brutos (Figura 2).

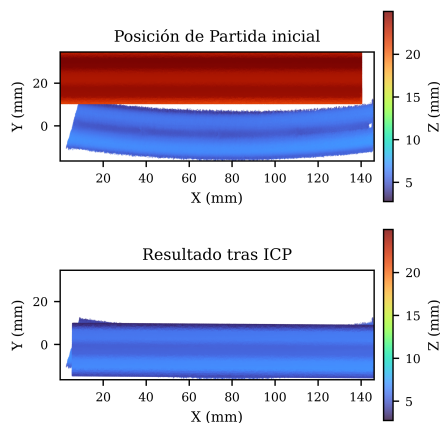


Figura 2: Posición inicial y resultado del registro global ICP entre la probeta curva y el CAD plano.

Una vez realizado este ajuste previo, se procede al registro fino utilizando una variante de ICP de correspondencia punto a punto. A diferencia de las variantes punto-a-plano, que suelen ser más rápidas, pero requieren el cálculo de normales y pueden sufrir deslizamientos en superficies lisas, el enfoque punto-a-punto se ha seleccionado por la naturaleza geométrica de este trabajo. La relativa simplicidad y alta simetría de la probeta de ensayo permiten que esta metodología garantice una mayor estabilidad frente a deslizamientos laterales no deseados durante las iteraciones.

Este registro inicial es fundamental ya que, al situar ambas geometrías en el mismo espacio virtual, permite que la trayectoria de decapado ideal (predefinida en el CAD) quede correctamente proyectada sobre la nube de puntos real, sirviendo de base para la corrección local por tramos que se describe a continuación.

3.2. Corrección Local por Tramos

Una vez que el sistema ha logrado un alineamiento global, el siguiente reto es absorber las deformaciones morfológicas severas que el ajuste rígido inicial no puede corregir. Para ello, el prototipo implementa una estrategia de segmentación y registro local que permite adaptar la trayectoria tramo a tramo. El procedimiento comienza con el cálculo de los límites longitudinales comunes entre la reconstrucción 3D y el modelo CAD de referencia. Para asegurar un solapamiento total y evitar errores de cálculo en los extremos de la pieza, el sistema identifica el valor mínimo más alto y el valor máximo más bajo en el eje X de ambas nubes. Bajo estos límites restringidos, tanto la reconstrucción como el modelo se subdividen en una serie de subnubes discretas siguiendo un paso longitudinal predefinido (Figura 3).

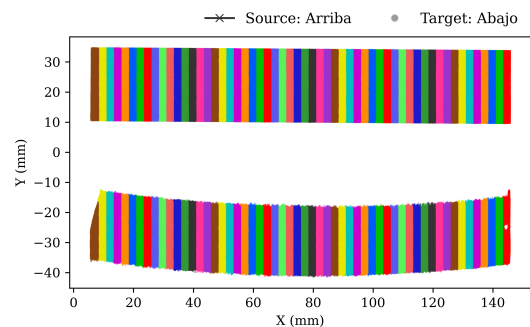


Figura 3: Emparejamiento por tramos: segmentación del modelo CAD ideal (arriba) y de la probeta curva (abajo) para su posterior ajuste local.

De forma paralela, la trayectoria definida en el CAD que dividida en 4 segmentos, se proyecta al sistema de coordenadas global mediante la transformación obtenida en la fase anterior. A continuación, los puntos que definen cada segmento se filtran espacialmente garantizando que ningún vector de la trayectoria ideal quede fuera del rango físico real escaneado de la probeta.

Posteriormente, se ejecuta un algoritmo ICP localmente, de forma independiente, para cada par de subnubes. En esta fase, el sistema almacena tanto la matriz de transformación específica de cada tramo como la coordenada longitudinal exacta de su aplicación.

Finalmente, para aplicar la deformación de la ruta, se emplea un método de adaptación morfológica local. Utilizando las coordenadas espaciales almacenadas como índice de búsqueda, el algoritmo agrupa los puntos de la trayectoria ideal en ventanas espaciales equivalentes a los tramos analizados. A cada bloque de puntos se le aplica matemáticamente la transformación inversa $T^{(-1)}$ obtenida de su respectivo ICP local (Figura 4). Esta operación discreta deforma la trayectoria plana original, obligándola a ceñirse con precisión a la curvatura de la probeta real sin alterar el ancho del surco ni su posición relativa.

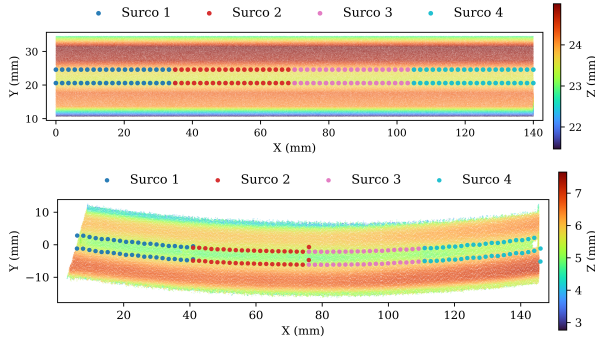


Figura 4: Trayectoria de decapado ideal sobre el modelo CAD (arriba) frente a su deformación calculada tras aplicar el ICP local a la probeta (abajo).

3.3. Suavizado Continuo y Filtrado de Seguridad Espacial

Como resultado de la transformación discreta por tramos descrita en la fase anterior, la trayectoria adaptada puede presentar pequeñas discontinuidades o "ruido" espacial en las transiciones entre matrices locales (Figura 4 parte inferior). Dado que el proceso físico de decapado exige un movimiento láser fluido y continuo, el último paso del algoritmo consiste en reconstruir las polilíneas de trabajo garantizando su continuidad geométrica y su viabilidad física sobre la pieza.

Para resolver este problema, los puntos de la trayectoria deformada se separan longitudinalmente en sus contornos superior e inferior. A cada contorno se le aplica un ajuste polinómico robusto de grado 3. Este modelo matemático opera de forma iterativa: evalúa la desviación estándar de los errores en cada ciclo y descarta los valores espaciales atípicos que puedan haberse generado por el ICP. A partir de los polinomios resultantes, el sistema regenera un nuevo mallado continuo de puntos a lo largo de los límites longitudinales reales, uniendo los tramos sin saltos bruscos.

Finalmente, para evitar que el escáner láser proyecte energía en el vacío (por ejemplo, debido a extrapolaciones matemáticas en los bordes o en extremos flotantes), se implementa un filtro de seguridad espacial. Utilizando una estructura de datos de búsqueda rápida (KD-Tree) basada en la nube de puntos objetivo real, el sistema calcula la distancia euclidiana de cada vector de la nueva trayectoria polinómica a la superficie física. Cualquier coordenada que exceda un umbral de seguridad estricto (0.3 mm) se descarta de forma algorítmica. Los puntos validados se reensamblan, cerrando el ciclo geométrico (Figura 5), lo que da como resultado los polígonos finales que se traducirán directamente al sistema de coordenadas de actuación del láser.

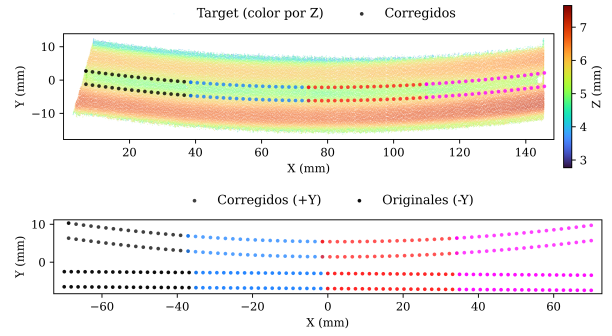


Figura 5: Trayectoria final suavizada sobre la superficie real (arriba) y vista cenital comparativa entre la ruta recta original y la deformada (abajo).

3.4. Transformación y sincronización al espacio de actuación

Una vez obtenida la trayectoria adaptada y suavizada, el paso final del procedimiento consiste en su traducción al sistema de coordenadas de actuación y la sincronización temporal con el movimiento de la pieza. Aunque la transformación analítica entre el espacio de reconstrucción y el sistema óptico del láser se detalla en trabajos paralelos, para este prototipo es fundamental centrarse en el mecanismo de disparo que garantiza la continuidad del proceso.

El sistema de sincronización se basa en establecer una correspondencia unívoca entre las coordenadas espaciales de la trayectoria y los pulsos generados por el encoder del eje de transporte. Para asegurar que el decapado se realice dentro del campo de visión óptico del escáner y con margen suficiente para el procesamiento en movimiento, se define un pulso de referencia P_{ref} que corresponde a una coordenada física fija y conocida en el espacio de actuación del láser. La estrategia de mapeo adoptada consiste en hacer coincidir la coordenada X máxima de cada surco con dicha referencia. Dado que el sistema de transporte presenta un movimiento creciente en el eje X, esta configuración garantiza que, en el instante del disparo, el láser disponga de un margen de actuación óptico para procesar toda la longitud del surco conforme la pieza avanza bajo el escáner.

Para determinar el pulso exacto de activación del primer surco, el sistema calcula un desplazamiento relativo desde el inicio del escaneo para localizar su punto de inicio x_{min} , siguiendo la relación:

$$\text{PulsoDisparo}_{\text{inicial}} = P_{ref} + \frac{x_{min}}{R} \quad (1)$$

Donde x_{min} representa la coordenada longitudinal mínima del surco y R es la resolución del pulso del encoder (mm/pulso). Esta señal actúa como el disparador maestro que indica al sistema que la pieza ha alcanzado la posición física de procesado.

Para mantener la continuidad en piezas compuestas por múltiples segmentos o surcos, el prototipo calcula los disparos sucesivos de forma acumulativa. Dado que la velocidad de transporte es constante y el avance es detectado por el encoder, el disparo del siguiente tramo ($i+1$) se programa sumando al pulso actual la longitud física del segmento precedente convertida a pulsos.

$$\text{PulsoDisparo}_{i+1} = \text{round}\left(P_i + \frac{\Delta x_i}{R}\right) \quad (2)$$

4. Resultados

Para validar el sistema, se realizaron pruebas de decapado continuo en probetas plásticas curvas, que emulaban componentes automotrices pintados.

4.1. Adaptación morfológica macroscópica

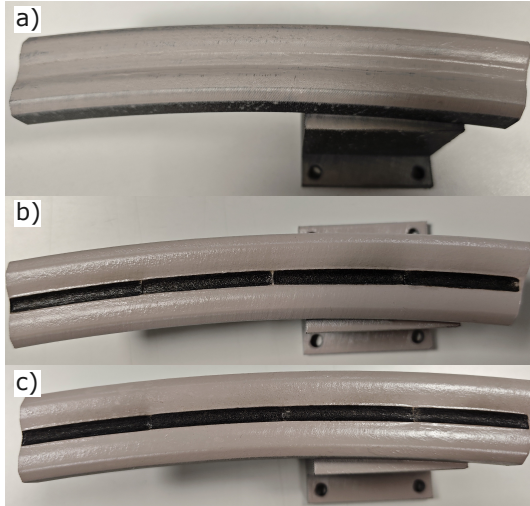


Figura 6: Resultado macroscópico decapado continuo. a). Pieza original. b) y c). Distintos resultados del proceso de decapado continuo.

Como muestra la Figura 6, el sistema logra una adaptación absoluta a la topografía de la pieza. La homogeneidad visual y la constancia del ancho del surco negro frente a la probeta original confirman que la compensación dinámica del eje Z mantiene la distancia focal óptima a lo largo de toda la trayectoria curva.

4.2. Análisis micrométrico de uniones

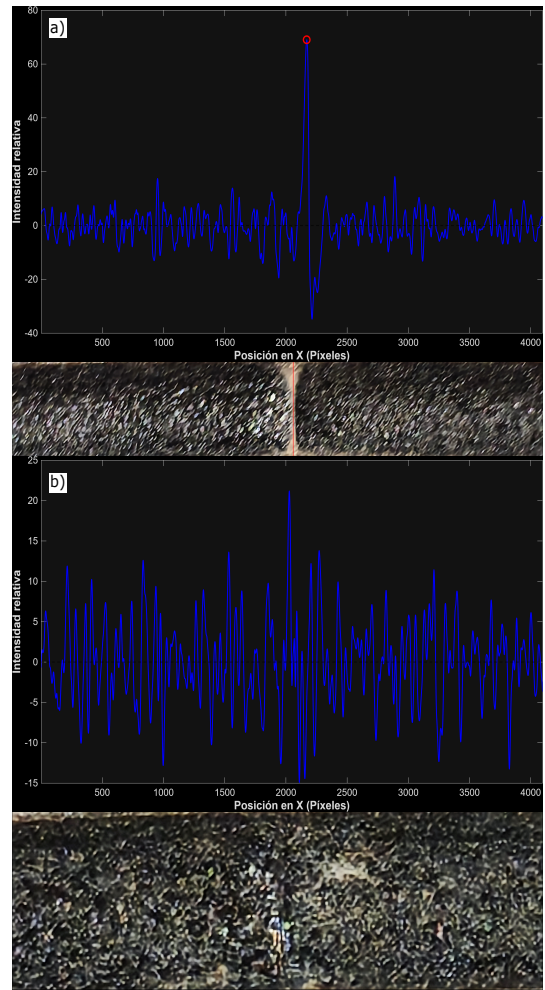


Figura 7: Análisis de error de unión entre segmentos. a) Caso de error en el que se ve y se detecta el surco. b) Caso de éxito en el que no se aprecia claramente el surco y el algoritmo no detecta una dominancia.

Para evaluar el “cosido” entre tramos con rigor, se desarrolló un algoritmo de inspección por visión artificial basado en el análisis de intensidad de señal 1D (Figura 7). El algoritmo aísla la franja del surco, elimina los gradientes de iluminación global y aplica un “Criterio de Dominancia” (relación señal/ruido) para distinguir entre discontinuidades reales y la textura natural del plástico.

Tras calibrar el sistema (1.9526 micras/píxel), los resultados arrojaron una combinación de casos de éxito (dominancia menor que 1.8, error imperceptible al ojo humano) y de fracaso, con brechas medidas automáticamente de hasta 147.42 micras, lo que equivale casi al triple de la resolución del encoder. Esto indica que, si bien el cálculo geométrico de empalme es exacto, la latencia electromecánica genera ligeras variaciones físicas en la ejecución.

5. Conclusiones

Se ha validado la viabilidad de un novedoso sistema de decapado láser *on-the-fly* capaz de adaptar trayectorias 3D ideales a geometrías 3D reales en movimiento. A nivel macroscópico, el control adaptativo absorbe con éxito las deformaciones morfológicas, garantizando un mecanizado constante sin necesidad de utillajes de precisión. Sin embargo, el análisis mediante visión artificial de las uniones revela que, a escala micrométrica, la sincronización entre el sistema de transporte y el disparo del láser aún presenta inestabilidades.

La mejora del hardware de actuación y de la compensación de latencias mecánicas constituyen los próximos pasos fundamentales para el sistema. Por un lado, para aislar y mitigar las desviaciones de sincronización pura reveladas en el cosido, como los inevitables deslizamientos del encoder sobre la cinta, será necesario evolucionar hacia arquitecturas de control optomecatrónico más robustas. Esto implicará explorar sistemas de odometría de tracción directa.

Por otro lado, para alcanzar la fiabilidad requerida en la industria estética del automóvil, es imprescindible fortalecer el algoritmo frente a piezas de mayor tamaño. El uso exclusivo de ICP presenta limitaciones críticas en flujo continuo cuando la sección escaneada es menor que la pieza a procesar, lo que puede generar deslizamientos o emparejamientos entre centroides ideales que no corresponden a la realidad. Para superar esta barrera, el trabajo futuro sustituirá el prealineamiento heurístico actual por una red neuronal capaz de realizar un registro grueso de nubes de puntos parciales. El entrenamiento de esta arquitectura mediante conjuntos de datos volumétricos previamente cortados o fragmentados, como ModelNet40, garantizará una inferencia de pose inicial exacta incluso con oclusiones, allanando el camino para la posterior adaptación local fina mediante métodos automáticos como Coherent Point Drift (CPD).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el FONDO EUROPEO DE DESARROLLO REGIONAL (FEDER)

COMUNITAT VALENCIANA 2021-2027, referencia IN-NEST/2024/300 y por el proyecto UPV 20250296 GAS13D.

Referencias

- ACSYS Lasertechnik GmbH, 2026. Orca: Sistema láser para grabado profundo, marcado y 3d. especificaciones técnicas. Disponible en línea: <https://acsyslaser.com/en/products/>, consultado en abril de 2026.
- Cui, M., Lu, L., Zhang, Z., Guan, Y., 2021. A laser scanner-stage synchronized system supporting the large-area precision polishing of additive-manufactured metallic surfaces. *Engineering* 7 (12), 1732–1740.
- Decker, N., Wang, Y., Huang, Q., 2020. Efficiently registering scan point clouds of 3d printed parts for shape accuracy assessment and modeling. *Journal of Manufacturing Systems* 56, 587–597.
- Dinh, V. H., Vu, Y. N. T., Cao, X. B., et al., 2023. Auto-focus methods in laser systems for use in high precision materials processing: a review. *Optics and Lasers in Engineering* 167, 107625.
- GF Machining Solutions, 2026. Gf machining solutions: AgieCharmilles laser P series: Soluciones de texturizado láser 3d de alta precisión. catálogo técnico. Disponible en línea: <https://www.gfms.com/es-es/machines/laser/laser-texturing/laser-p-series.html>, consultado en abril de 2026.
- Hoppe, G., Schneider, J., Nekarda, J., Preu, R., Meyer, F., Diehl, M., 2025. Oscillation compensation in on-the-fly laser processing via optical tracking sensors. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.
- Jiang, T., Ding, H., Rong, M., Zhang, Y., Xing, Y., Wang, G., Ren, X., Zhang, X., Ding, L., Huang, Z., 2025. Ultra-thin f-theta metalens with high focus resolution and large field of view. *Optics Express* 33 (18), 38099–38112.
- Ma, W., Zhang, J., Zhao, L., Hu, Z., Zhao, X., Sun, T., Zhang, J., 2025. 7-axis synchronization-integrated on-the-fly laser texturing system of freeform surface: design and development. *International Journal of Extreme Manufacturing* 7 (1), 015103.
- Munaro, M., So, E. W. Y., Tonello, S., Menegatti, E., et al., 2015. Efficient completeness inspection using real-time 3d color reconstruction with a dual-laser triangulation system. *Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection: Advances and Applications*, 201–225.
- TRUMPF SE + Co. KG, 2026. TRUMPF SE + Co. KG: Trulaser 1030: Especificaciones técnicas y catálogo comercial. Disponible en línea: <https://www.trumpf.com>, consultado en abril de 2026.
- Weyrich, M., Wang, Y., Winkel, J., Laurowski, M., 2012. High speed vision based automatic inspection and path planning for processing conveyed objects. *Procedia Cirp* 3, 442–447.
- Zhu, T., Ji, S., Zhang, C., Yin, Y., 2023. On-the-fly laser processing method with high efficiency for continuous large-scale trajectories. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 129 (5), 2361–2370.