

Reconocimiento de fallas para control de calidad basado en técnicas tomográficas

R. Barbuzza¹, M. del Fresno¹, M. Vénere^{1,2} y A. Clausse^{1,2}

¹PLADEMA-ISISTAN, Universidad Nacional del Centro, Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina

²También CNEA-CONICET, e-mail: rbarbu@exa.unicen.edu.ar

Resumen— En este trabajo se presentan dos técnicas de inspección de productos mediante ensayo no destructivo para la detección de imperfecciones y la visualización de piezas defectuosas. El primer enfoque se basa en la reconstrucción de una imagen tomográfica a partir de distintas proyecciones del objeto analizado y en la segmentación de la misma para la detección de fallas. Además, se describe una segunda alternativa que permite acelerar el procesamiento, ya que en este caso el análisis se efectúa directamente sobre las proyecciones originales del objeto y permite incorporar información a priori sobre el material y la geometría del producto como también sobre las fallas habituales. Los resultados obtenidos muestran la factibilidad de utilizar estos métodos en aplicaciones de inspección de objetos, contribuyendo a la automatización de procesos de control de calidad.

Palabras clave— Inspección de objetos, ensayos no destructivos, reconstrucción tomográfica, visualización y segmentación de imágenes 3D.

I. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de ensayos no destructivos basadas en la utilización de ultrasonido, radiografía o tomografía computada (CT), entre otras, ofrecen la ventaja de permitir la inspección de la composición interna y externa de un objeto sin alterar su naturaleza. Actualmente, el uso de estas tecnologías se restringe casi exclusivamente al campo de la medicina y están basadas en equipos difíciles de transportar, lo que ha limitado su aplicación en otros ámbitos. Sin embargo, los avances en la tecnología de rayos X y detectores, y la velocidad de los microprocesadores de computadoras personales, brindan nuevas alternativas de aplicación de ensayos no destructivos en áreas no convencionales. Esta tecnología puede ser de gran utilidad por ejemplo en el descarte de piezas defectuosas o en el mantenimiento preventivo de componentes industriales, también en seguridad de aduanas para detección de armas, explosivos y otros objetos peligrosos.

La posibilidad de obtener imágenes introspectivas de objetos a partir de pulsos provenientes de equipos Plasma Focus (PF) constituye una tecnología reciente e innovadora, la cual proporciona interesantes posibilidades de aplicación. Comparados con otros dispositivos de radiación, los emisores PF son equipos pequeños y portátiles, además de ser fuentes de radiación de gran intensidad y de muy corta duración (10-50 ns.), por lo que permiten la obtención de proyecciones de objetos de diversa composición y aún de objetos en movimiento. Dentro de esta red de investigación se ha diseñado y construido un dispositivo PF con el cual se han obtenido imágenes introspectivas de diversos objetos, en su mayoría metálicos [1].

En este trabajo se presentan técnicas específicas para el análisis introspectivo de componentes, basadas en la inspección no destructiva de piezas usando una fuente PF, capaces de contribuir al control de calidad mediante ensayos

complementarios a las técnicas convencionales. Se explica inicialmente un método desarrollado en base a la reconstrucción tomográfica a partir de proyecciones del objeto analizado y el consecuente procesamiento de la imagen mediante algoritmos de segmentación para la localización de fallas. Luego, se discute una segunda opción basada en la inspección directa de las proyecciones del objeto, la cual constituye una alternativa de inspección novedosa que permite reducir notablemente el costo computacional de este proceso. Además, es posible incorporar información adicional sobre el modelo nominal de la pieza a inspeccionar y de los defectos más frecuentes de fabricación, permitiendo perfeccionar los mecanismos de búsqueda automática de defectos.

II. ALTERNATIVAS PARA LA INSPECCIÓN DE OBJETOS

Entre las diversas técnicas defectoscópicas utilizadas, las radiografías y tomografías han tomado gran impulso en el pasado reciente [2]. Casi la totalidad de los métodos de inspección visual automática utilizados actualmente son específicos al producto a examinar. Además, generalmente usan sólo una proyección del objeto, lo que puede dificultar la detección de fallas debido a que en la imagen proyectada se superpone la información sobre su estructura interna [3]-[6]. Otra alternativa es la captura de varias proyecciones desde diferentes puntos de vista, aunque en este caso el procesamiento resulta más complejo, ya que se debe realizar un análisis multi-imagen [7].

A diferencia de utilizar imágenes proyectadas en forma individual, la CT permite reconstruir una imagen 3D del objeto a partir de proyecciones capturadas en diferentes ángulos [8]. Esta técnica es poderosa ya que permite obtener imágenes de alta calidad del interior de los objetos y efectuar sobre ellas un análisis volumétrico minucioso a partir de un procesamiento adecuado. Sin embargo, el proceso de reconstrucción tomográfica involucra un elevado costo computacional, lo que ha limitado su aplicación a situaciones donde la exigencia de tiempos de respuesta de los algoritmos no es demasiado estricta. Por esta razón, es deseable el desarrollo de métodos de reconstrucción veloces que puedan obtener imágenes tomográficas de alta calidad a partir de pocas proyecciones.

III. ANÁLISIS INTROSPECTIVO MEDIANTE TOMOGRAFÍA

Un primer enfoque para el análisis de la composición interna de objetos y detección de imperfecciones se basa en el procesamiento de imágenes obtenidas por reconstrucción tomográfica. Como se mencionó, a partir de un conjunto de proyecciones de un objeto desde diferentes ángulos, con respecto a una fuente de radiación, es posible reconstruir una imagen tomográfica. A modo de ejemplo, se muestran 8 proyecciones radiográficas de un conector BNC (Fig.1), obtenidas mediante un dispositivo PF, con una resolución de 0.08 mm./píxel [1].

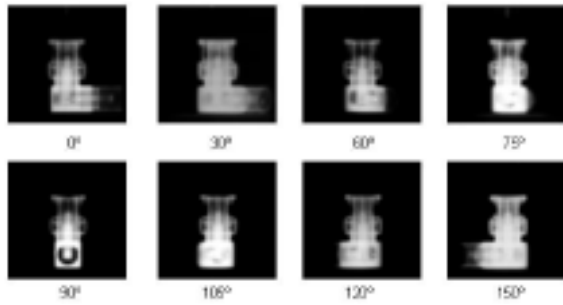


Fig. 1. Radiografías de un conector BNC en 8 ángulos diferentes

A. Algoritmo estocástico de reconstrucción tomográfica

En la literatura se presenta una gran variedad de métodos que resuelven el problema de la reconstrucción tomográfica a partir de proyecciones [8]. Tales técnicas han sido ampliamente usadas, ya que son rápidas y trabajan bien en caso de contar con un conjunto completo de proyecciones (como sucede en CT médicas). Otros enfoques, basados en métodos estocásticos, logran obtener imágenes de calidad con un conjunto limitado de proyecciones.

En este trabajo se utilizó una técnica probabilística para la reconstrucción tomográfica basada en el método de Monte Carlo [9]. Según este método, se realiza el muestreo de una secuencia de imágenes que van cambiando la tonalidad de algunos de sus pixels, hasta encontrar una que se ajuste al conjunto de proyecciones reales. Para asegurar la convergencia del algoritmo de búsqueda, se establece un criterio de aceptación de los cambios propuestos, considerando el error cuadrático medio entre las proyecciones reales y las de la imagen en reconstrucción, respecto de los mismos ángulos. En la Fig.2 se muestra el resultado para la reconstrucción con Monte Carlo del conector BNC, a partir de las 8 placas de la Fig.1.



Fig. 2. Cortes cartesianos de la tomografía del conector BNC

Si bien los métodos de Monte Carlo se utilizan en la resolución de problemas de optimización en general, su aplicación en el problema de reconstrucción tomográfica es novedosa. Una de las características de esta técnica es que permite incorporar fácilmente distintas estrategias para mejorar la calidad de la reconstrucción, así como la performance del algoritmo. Como se describe en [9], se estudiaron distintas opciones de muestreo y mutación de puntos, y se desarrolló una técnica de reconstrucción tomográfica con multigrilla, la cual logra disminuir el costo computacional del proceso. Aún así, el tiempo computacional para reconstruir un corte bidimensional tomográfico con una resolución de 256x256 puntos es del orden de los dos minutos, con lo cual esta técnica queda limitada para aplicarla en algunos procesos de inspección.

B. Detección y visualización de defectos

La imagen generada a partir del proceso anterior representa el campo de atenuación de los rayos emitidos sobre el objeto debido a la presencia de material. Con el fin de determinar la presencia de fallas, esta imagen se somete a

un proceso de segmentación [10]. De acuerdo a las características de las tomografías, un enfoque apropiado para la segmentación de la imagen consiste en el método de crecimiento de regiones [11], ya que es un algoritmo robusto con respecto a la presencia de ruido y a variaciones de tonalidades dentro de los objetos [12]. Según este enfoque, cada región de interés comienza a formarse a partir de uno o más puntos iniciales (semillas) y evoluciona por incorporación sucesiva de los voxels vecinos similares a los ya integrados. De esta manera, se logra determinar las regiones correspondientes al objeto analizado como las posibles fallas presentes en él. Una vez determinados los objetos, éstos pueden ser evaluados a partir de la medición de sus propiedades geométricas [10].

El resultado del proceso de segmentación puede ser analizado mediante la inspección visual de cortes o a través de proyecciones del objeto. Mediante el empleo de técnicas de computación gráfica, se permite la generación de proyecciones mediante *rendering* de volúmenes (Fig.3-a) y la aplicación de planos de corte en direcciones arbitrarias (Fig.3-b), las cuales brindan interesantes opciones de análisis visual introspectivo [13]. Como se puede apreciar, la calidad de la imagen es altamente aceptable, aún cuando fue reconstruida a partir de una cantidad reducida de proyecciones. Además de estas opciones, también se provee la opción de visualización por *rendering* de superficies [13]. La descripción poligonal asociada a las regiones detectadas se obtiene directamente a partir del resultado del proceso de segmentación anterior. Como se describe en [12], se genera una triangulación inicial a partir de las caras de los voxels frontera de cada región segmentada. Luego, esta malla se procesa con el fin de tratar casos conflictivos y suavizarla. Esta estrategia elimina la posibilidad de situaciones ambiguas que pueden generar huecos en las superficies resultantes, lo que es un aspecto desfavorable de técnicas tradicionales como *marching cubes* [14], además de que también poseen las desventajas inherentes a los métodos de *thresholding*. En la Fig.4-a se puede apreciar el conjunto de proyecciones originales de una pieza correspondiente al seguro de un arma, la cual posee un defecto típico de burbuja de aire en su interior, y la correspondiente visualización de superficies (Fig.4-b).



Fig. 3. Proyección del conector BNC: vista externa con rotación (a), aplicación de planos de corte a la imagen tomográfica (b)

La estrategia de reconstrucción descrita permite la obtención de imágenes tomográficas de calidad altamente aceptable, a partir de un número reducido de proyecciones del objeto. Sin embargo, el tiempo insumido para encontrar la solución es considerable y esto puede afectar significativamente la velocidad de inspección y en ciertos procesos industriales puede resultar impracticable [5], [15]. A tal fin, se describe en la siguiente sección un enfoque diferente de análisis defectoscópico que utiliza información a priori sobre la pieza a inspeccionar y permite acelerar el proceso de inspección al evitar el proceso de reconstrucción tomográfica.

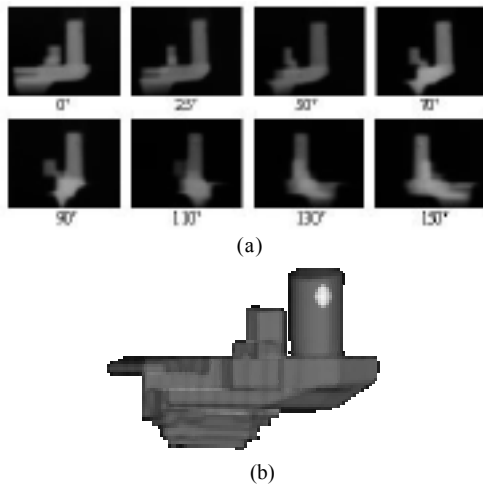


Fig. 4. Detección de defectos mediante tomografía: Proyecciones del seguro de arma (a). Visualización de superficies segmentadas (b)

IV. INSPECCIÓN DE PIEZAS CON CONOCIMIENTO

En general, al realizar un análisis no destructivo, la pieza que se somete al proceso es conocida. Durante su producción, los productos se someten a un control de calidad básicamente para detectar fallas internas o externas y controlar las dimensiones mediante la desviación de la geometría real respecto de la geometría nominal. Conocer la geometría del diseño de la pieza brinda información adicional que puede combinarse con la obtenida a partir de las radiografías para acelerar el proceso de inspección a valores por demás interesantes. También los distintos tipos de fallas (fisuras, burbujas de aire, etc.) pueden representarse con modelos de superficies de formas variadas (esferas, elipsoides, etc.), conformando así una librería de los defectos más frecuentes. En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de la malla de superficie generada a partir de la especificación del modelo correspondiente al seguro de arma. Para generar las mallas de superficie de la pieza se usó una herramienta CAD, y se consideraron las dimensiones reales de diseño.

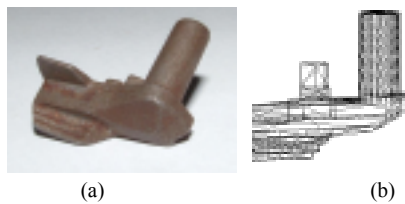


Fig. 5. Fotografía de una pieza de fundición correspondiente a un seguro de arma (a) y malla de triángulos de la superficie (b)

A diferencia de la técnica de segmentación anterior que trabaja sobre el conjunto de voxels, este método centra el proceso en los triángulos que conforman la geometría de la pieza, acotando así la complejidad del algoritmo.

En primer lugar esta técnica debe simular proyecciones radiográficas de la malla de superficie correspondiente al objeto analizado. Una proyección es una función $g(s, q)$ de atenuación de intensidad de cada rayo s en dirección q que atraviesa el objeto (Fig. 6). Esta atenuación de intensidad es proporcional al recorrido del rayo en el interior del objeto.

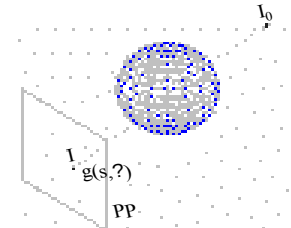


Fig. 6. Proyección $g(s, q)$ de una malla de superficie

Luego, el algoritmo desarrollado simula atravesar la malla de superficie con un conjunto de rayos equidistantes y paralelos en una cierta dirección q , y calcula para cada uno de estos rayos los puntos exactos de corte con los triángulos que intercepta. Con estos puntos, se calcula la distancia que cada rayo recorre en el interior de la malla, valor que es proporcional a la atenuación de intensidad buscada [13]. La herramienta desarrollada fue evaluada con casos de prueba de objetos simples (esféricos, elipsoidales, etc.), y las proyecciones obtenidas coincidieron con los resultados esperados. Además, se utilizó la herramienta para simular proyecciones de la pieza del seguro del arma de la Fig. 5, algunas de las cuales se muestran en la Fig. 7.

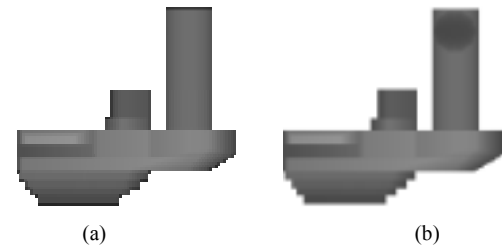


Fig. 7. Proyecciones a 0° . a) sin defecto $g_{\text{modelo}}(s, 0^\circ)$. b) con defecto esférico en la parte superior del cilindro $g_{\text{condefecto}}(s, 0^\circ)$.

Las proyecciones simuladas con la herramienta se comparan con las proyecciones obtenidas con el equipo PF para determinar si la pieza tiene defecto o no. Se establecieron criterios de evaluación de defectos clásicos que comparan las dimensiones de la pieza real respecto de la pieza nominal de librería. Para determinar la presencia de defectos se aplicaron algoritmos de búsqueda exhaustivos. El siguiente algoritmo, correspondiente a la función *Posicionamiento*, permite posicionar un defecto (ej. esfera) con centro en cada punto p interior a la malla de superficie del objeto. En cada posición p se calcula el error cuadrático medio, $e(p)$, entre la proyección simulada del modelo ideal con un defecto en p , $g_{\text{condefecto}}(s, q)$ y la compara con la proyección de $g_{\text{pr}}(s, q)$ obtenidas en los experimentos con PF, para todos los ángulos q de proyección.

Function *Posicionamiento*()

```
{ emínimo = • ;
  Para cada punto  $p$  en el espacio de búsqueda {
    Trasladar defecto ubicando su centro en  $p$ 
     $e = \sum_q \sum_s (g_{\text{condefecto}}(s, q) - g_{\text{pr}}(s, q))^2$ 
    If ( $e < e_{\text{mínimo}}$ ) { Posición =  $p$ ; emínimo =  $e$ ; }
  }
  return Posición; }
```

Una vez ubicada la posición p en donde existe un defecto, se puede hacer una búsqueda que ajuste mejor el tamaño del mismo, realizando transformaciones de escala. El siguiente algoritmo incrementa la escala del defecto hasta encontrar la que mejor ajusta al defecto real, utilizando el indicador del error cuadrático medio entre proyecciones.

```

Function Escalado()
{ p=Posicionamiento();
  Trasladar defecto ubicando su centro en p
  e=-∞ ; emínimo=∞ ; escala=0.5;
  Mientras (e<emínimo) {
    Escalar(defecto, escala);
    e=Sq Ss (gconefecto(q), gpf(q))2
    If (e<emínimo) {escalado=escala; emínimo=e }
    escala=+0.5 }
  return escalado; }

```

Los algoritmos fueron testeados con casos de prueba, de manera de conocer de antemano la posición y el tamaño del defecto que se debía buscar. Los resultados arrojados respecto de la ubicación y escala del defecto encontrado siempre coincidieron con lo esperado. Los tiempos de respuesta para estos casos de prueba, en un procesador Pentium III 800 Mhz, 256 MB RAM, fueron inferiores a los 10 seg., dependiendo obviamente del tamaño del objeto y de la resolución de rayos usada.

Además de los casos de prueba utilizados, se aplicaron los algoritmos desarrollados al caso real de proyecciones obtenidas con un equipo PF de la pieza correspondiente al seguro del arma de la Fig.5-a. El tiempo de procesamiento para detectar un defecto típico de burbuja de aire (defecto esférico) fue de 2.6 seg., con el mismo procesador. Los resultados obtenidos respecto del tiempo de procesamiento para ubicar un defecto y su tamaño son aceptables y optimistas para que esta tecnología pueda incorporarse al proceso productivo.

Para la visualización de los resultados, la herramienta desarrollada presenta una opción de *rendering* de superficies en la que se puede apreciar la ubicación y dimensiones del defecto, en caso de ser hallado (Fig. 8).

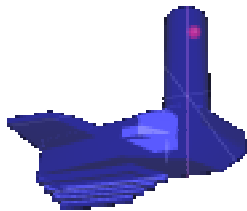


Fig. 8. Visualización 3D de la posición en la que se encuentra el defecto en la pieza inspeccionada

V. CONCLUSIONES

Se han presentado dos técnicas no convencionales para aplicaciones de control de calidad, basadas en la utilización de dispositivos PF para la obtención de imágenes introspectivas de diversos objetos, incluso metálicos. Ambas alternativas se están incorporando actualmente a desarrollos en el área de inspección industrial.

El primer enfoque se basa en la reconstrucción tomográfica del objeto analizado a partir de un número reducido de proyecciones, mediante un algoritmo Monte Carlo. La estrategia se combina con el procesamiento de las imágenes 3D generadas, mediante algoritmos de segmentación por crecimiento de regiones para la detección de defectos e incorpora opciones de visualización convenientes. Los resultados experimentales han sido satisfactorios, obteniendo imágenes de alta resolución que permiten apreciar con claridad detalles internos submilimétricos. Esto posibilita su aplicación a diversas opciones de control de calidad, pero sin embargo no resulta

apropiada en el caso de inspección de componentes en líneas de producción, debido al tiempo involucrado en el procesamiento.

La segunda estrategia de análisis defectoscópico logra tiempos aceptables para inspección en tiempo real. En este caso, el enfoque se basa en el procesamiento directo de las proyecciones del objeto real por comparación con vistas simuladas de un modelo de diseño de la pieza inspeccionada. Los resultados obtenidos también han sido altamente aceptables y con costo computacional reducido. Si bien en este caso la posibilidad de inspección interna de las componentes es limitada, ya que carece de un proceso de reconstrucción tomográfica, el algoritmo es adecuado para identificar defectos rápidamente y desechar las piezas correspondientes durante el proceso de fabricación.

REFERENCIAS

- [1] M. Vénere, C. Moreno, A. Clausse, R. Barbuzza y M. del Fresno, "Tomographic system based on plasma focus X-rays", *Nukleonika*, Vol. 46 (1), pp 5-6, 2001
- [2] T. Newman, A. Jain, "A survey of automated visual inspection", *Comp. Vision and Image Understanding*, 61(2): pp 231-262, 1995
- [3] C. Neubauer, "Intelligent X-ray inspection for quality control of solder joints", *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, Part C, 20 (2): pp 111-120, 1997
- [4] A. Noble, R. Gupta, J. Mundy, A. Schmitz, R. Hartley, "High Precision X-Ray Stereo for Automated 3D CAD-based Inspection", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 14 (2): pp 292-302, 1998
- [5] M. Simon, C. Sauerwein, "Cone beam tomography for quality control and rapid product development", *Insight*, 42 (10), 2000
- [6] D. Mery, D. Filbert, T. Jaeger, "Image Processing for Fault Detection in Aluminum Castings", *Analytical Characterization of Aluminum and Its Alloys*, Ed. MacKenzie, Dekker Inc., 2004
- [7] D. Mery, "Detección de fallas en piezas de metal fundido mediante el procesamiento digital de secuencias de imágenes radioscópicas", *Koester Verlag*, Berlin, 2001
- [8] G. Herman, A. Kuba, "Discrete Tomography Foundations", *Algorithms and Applications*, Birkhäuser, 1999
- [9] R. Barbuzza, M. del Fresno, A. Clausse, M. Vénere, "Introspección tomográfica de piezas como herramienta en la restauración de materiales", *J.Técnicas restauración del patrimonio*, LEMIT, 2003
- [10] K. Castleman, "Digital Image Processing", *Prentice Hall*, 1996
- [11] R. Adams, L. Bischof, "Seeded region growing", *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.16, pp 641-647, 1994
- [12] M. del Fresno, M. Vénere, "Un método de segmentación de imágenes digitales 3D por crecimiento de regiones", *VIII CACIC*, 2002
- [13] J. Foley, A. Van Dam, S. Feiner, J. Hughes, "Introduction to Computer Graphics", *Addison-Wesley*, 1996
- [14] W. Lorensen, H. Cline, "Marching Cubes: a high resolution 3D surface reconstruction algorithm", *Computer Graphics*, 21(4), 1987
- [15] A. Castaño, P. Paggi, R. Barbuzza, M. Vénere y A. Clausse, "Control de calidad de manufactura con procesamiento tomográfico inteligente", *XXX Reunión Anual AATN 2003*, Nro. 23, 2003