

Simulación de defectos subsuperficiales con forma irregular y aleatoria para la inspección no-destructiva de objetos mediante Termografía Infrarroja

RAMÍREZ-GRANADOS, Juan Carlos*†, GÓMEZ-LUNA, Blanca, MORENO-MARTÍNEZ, Jatziri y ALMANZA-ACEVEDO, Jessica

Universidad de Guanajuato

Recibido Agosto 10, 2016; Aceptado Septiembre 28, 2016

Resumen

Presentamos un método para la simulación numérica de objetos que tienen defectos subsuperficiales con forma irregular y aleatoria. Los defectos simulados pueden representar huecos, incrustaciones, delaminaciones, grietas, cambios de densidad, etc. El método consiste en la creación de una sección transversal y un perfil de espesor generados mediante la superposición de gaussianas con medias y anchos aleatorios. El volumen encerrado por la sección transversal y el perfil de espesor es considerado como el material defectuoso. Los objetos defectuosos simulados pueden ser inspeccionados de manera no-destructiva mediante termografía infrarroja pulsada para detectar y caracterizar a los defectos subsuperficiales. Este trabajo contribuye a la elaboración de simulaciones numéricas más realistas del proceso de inspección de objetos complejos mediante termografía infrarroja.

Defecto subsuperficial, Forma irregular y aleatoria, Inspección no-destructiva, Termografía infrarroja

Abstract

We present a method to simulate objects with subsurface defects with irregular and random shape. The simulated defects may represent cavities, incrustations, delaminations, cracks, density changes, etc. The proposed method consist of the generation of a cross section and a thickness profile by means of the superposition of Gaussian curves with random expected value and width. The volume enclosed by the cross section and the thickness profile is the defective material. Then, the defective object may be tested by a nondestructive technique such as Infrared Pulsed Thermography in order to detect subsurface defects and to characterize them. This work contributes to the elaboration of more realistic numerical simulations about the nondestructive testing of complex objects by infrared thermography.

Subsurface defect, irregular and random shape, Nondestructive testing, Infrared thermography

Citación: RAMÍREZ-GRANADOS, Juan Carlos, GÓMEZ-LUNA, Blanca, MORENO-MARTÍNEZ, Jatziri y ALMANZA-ACEVEDO, Jessica. Simulación de defectos subsuperficiales con forma irregular y aleatoria para la inspección no-destructiva de objetos mediante Termografía Infrarroja. Revista de Energía Química y Física 2016, 3-8: 57-63.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jcramirez@ugto.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

La inspección de objetos mediante técnicas no-destructivas es un campo de gran interés para los sectores industriales y de la salud.

Este interés se fundamenta por una parte en políticas de reducción de costos de producción y operación de los productos, y por otra parte, en mejorar los servicios de salud mediante técnicas de diagnóstico confiables, seguras y cómodas para el paciente.

En la actualidad está disponible una amplia variedad de técnicas de inspección no-destructivas como las pruebas visuales, por ultrasonido, líquidos penetrantes, corrientes parásitas y las pruebas termográficas, entre otras.

Las técnicas termográficas destacan entre las demás debido a que son pruebas, sin contacto, seguras, rápidas, operan a campo completo y pueden ser aplicadas a prácticamente cualquier tipo de objeto y material [1].

Existen varias técnicas termográficas especialmente diseñadas para la inspección no-destructiva de objetos.

De todas ellas, podríamos decir que las dos técnicas termográficas fundamentales son la termografía pulsada y la termografía lock-in o de amarre de modos [2].

Ambas técnicas son usadas para determinar la respuesta térmica de un objeto al ser irradiado con una señal pulsada o modulada, respectivamente. [3-5]

Uno de los mayores desafíos de las técnicas de inspección termográficas es determinar las características internas de un objeto opaco a partir de la distribución de su temperatura superficial.

Es decir, a través del análisis de la respuesta térmica superficial de un objeto se busca determinar sus características internas tridimensionales tales como su estructura, la presencia de defectos internos, su profundidad, su espesor y su forma, en otros. Este es un reto similar al enfrentado por técnicas tales como la tomografía computarizada y la resonancia magnética pero con la dificultad adicional de que la distribución de temperatura superficial es el resultado de la interacción entre las ondas térmicas y estructuras internas que pueden estar localizadas a diferentes profundidades. El análisis de este tipo de información ha sido un gran reto desde los orígenes de la termografía en los años 70's y lo sigue siendo en la actualidad. [6]

Para evaluar la condición y calidad de un objeto o componente es necesario conocer las características de su estructura interna, es decir, es necesario saber si tiene defectos en su interior y como son éstos. Esta meta puede ser alcanzada si logramos predecir la respuesta térmica que tendrá un objeto cuando en su interior existen defectos.

Determinar la respuesta térmica de los objetos defectuosos mediante métodos analíticos puede ser una tarea muy compleja e incluso imposible en algunos casos, ya que la ecuación de difusión de calor tiene solución exacta sólo para algunas geometrías simples. Sin embargo, los defectos encontrados realmente en el interior de los objetos pueden ser más complejos que simples esferas, cubos y cilindros.

Los defectos internos que podríamos encontrar en la práctica incluyen huecos, incrustaciones, delaminaciones, fracturas, cambios de densidad, etc. Para detectar y caracterizar este tipo de defectos subsuperficiales mediante termografía infrarroja es indispensable conocer la respuesta térmica de los objetos defectuosos.

Por esta razón, en este trabajo presentamos un método para simular numéricamente objetos en cuyo interior hay defectos con forma irregular y aleatoria, justo como ocurriría durante la inspección de un objeto real mediante termografía infrarroja.

El método que proponemos para la simulación numérica de los defectos irregulares y aleatorios consiste en la generación de una sección transversal y un perfil de espesor mediante la superposición de varias curvas gaussianas con valor esperado y ancho aleatorios. El volumen encerrado por la sección transversal y el perfil de espesor es considerado como el volumen defectuoso.

A continuación presentamos los fundamentos del método propuesto para la generación de defectos con forma irregular y aleatoria.

Marco Teórico

En el área de análisis de ondas son bien conocidas y usadas las series de Fourier. Las series de Fourier (Ec. 1) son una herramienta matemática que nos permite representar a cualquier señal periódica y continua mediante una suma infinita de funciones senoidales y/o cosenoidales más simples dadas por:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right] \quad (1)$$

Donde a_n y b_n son coeficientes de Fourier, T es el periodo y $f(t)$ es la serie de Fourier. Esta suma de funciones con frecuencias armónicas converge a cualquier función periódica si los coeficientes son los apropiados.

Así pues, una serie de Fourier es una suma o superposición infinita de funciones senoidales y/o cosenoidales cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental.

El resultado de esta superposición de ondas es una señal que se asemeja a cualquier tipo de perfil incluyendo cuadrados, triángulos, dientes de sierra e incluso a ondas con perfil asimétrico. Por esto es que las series de Fourier son una herramienta muy útil y valiosa para el análisis y síntesis de funciones complejas a través de otras más simples.

Por otra parte, en el campo de la inspección no-destructiva de materiales a través de técnicas termográficas podemos encontrar dos tipos de problemas: directos e inversos. En los problemas directos son conocidas las características del objeto y determinamos su distribución de temperatura espacial y temporal. Por el contrario, en los problemas de tipo inverso se conoce o se mide la distribución de temperatura y a partir de esa información determinamos las propiedades y características del objeto.

Los problemas de transferencia de calor inversos son considerablemente más difíciles de resolver debido a que en ocasiones la solución no es única y a menudo es necesario implementar métodos numéricos para resolverlos mediante la solución iterativa de casos directos para aproximarnos progresivamente a la solución. Es por esto que la resolución de problemas de transferencia de calor de tipo inverso ha sido y sigue siendo de gran interés para la inspección no-destructiva de materiales mediante termografía infrarroja.

Más aún, los nuevos métodos para el análisis de datos termográficos que son aplicados a la inspección no-destructiva de materiales requieren de simulaciones numéricas que ayuden a comprender y predecir mejor la difusión de calor en objetos complejos como los que podríamos encontrar en la vida real. Por esta razón, proponemos un método para la simulación numérica de defectos internos con forma irregular y aleatoria.

En este método simulamos a los defectos internos mediante la superposición de una serie de funciones simples de manera análoga a la representación de cualquier función continua mediante una serie de Fourier; sin embargo, las funciones que nosotros superponemos son gaussianas de amplitud unitaria como la mostrada en la Ec. 2:

$$f_i(x) = \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

Donde el subíndice i denota el número de la curva, μ la media y σ^2 el ancho (varianza). En nuestro caso, μ y σ^2 son variables aleatorias y por lo tanto sus valores cambian cada vez que son calculados.

La superposición de una serie finita de estas gaussianas nos permite generar una sección transversal de un defecto con forma irregular y aleatoria. Luego, asociamos un espesor a cada uno de los nodos encerrados por la sección transversal mediante otra función gaussiana bidimensional para darle volumen al defecto.

A este volumen defectuoso le asignamos las propiedades termofísicas correspondientes. En este trabajo, la simulación numérica de objetos con defectos subsuperficiales irregulares fue implementada en Matlab. Cabe mencionar que nuestro algoritmo genera defectos distintos cada vez que es ejecutado debido a la naturaleza estocástica de las funciones superpuestas.

Resultados

A través del método propuesto modelamos sólidos semi-infinitos con defectos subsuperficiales de forma irregular y propiedades termofísicas distintas a las del resto del material sano.

En este método, el primer paso es la generación de una función gaussiana de amplitud unitaria, con valor esperado y ancho aleatorio como la mostrada en el gráfico 1.

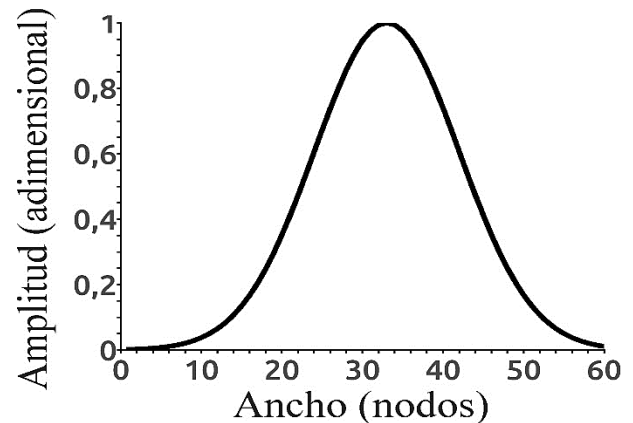


Gráfico 1 Gaussiana con valor esperado y ancho aleatorio

Cada vez que ejecutamos el algoritmo, éste genera una función gaussiana con valor esperado y ancho distinto debido a que definimos estos parámetros como estocásticos. En total generamos diez funciones gaussianas aleatorias como las mostradas en el gráfico 2.

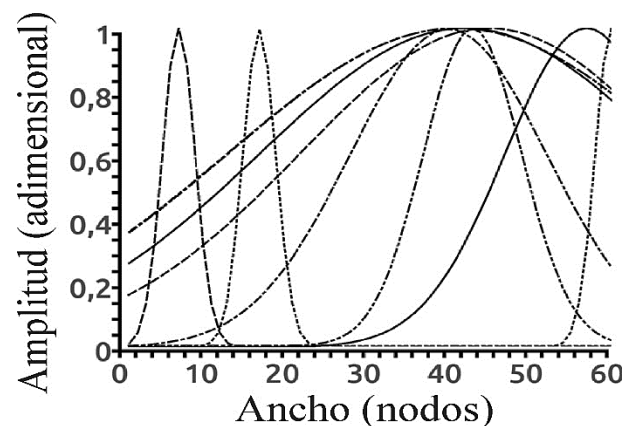


Gráfico 2 Serie de funciones gaussianas con valor esperado y ancho aleatorio

Las funciones gaussianas mostradas en el gráfico 2 son sumadas o superpuestas.

Después, la curva resultante es normalizada y escalada por un factor de magnitud aleatoria. Luego descretizamos la curva o perfil debido a que las dimensiones del defecto deben tener valores enteros cuando lo representamos a través de una malla de nodos. La malla de nodos también es útil para el análisis de difusión de calor que requieren los métodos termográficos de inspección no-destructiva basados en diferencias finitas que son aplicados a objetos con geometrías complejas. El resultado de los pasos anteriores es un perfil con forma irregular y aleatoria como el que presentamos en el gráfico 3.

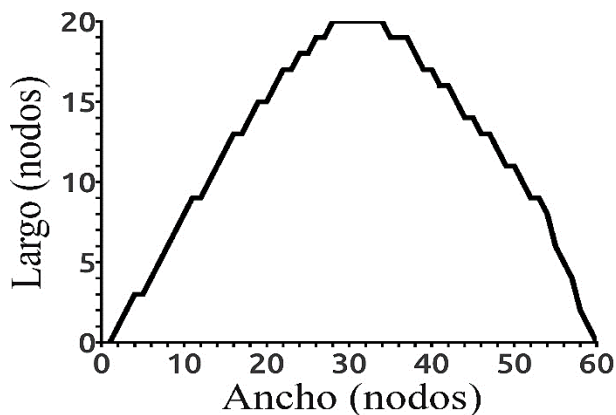


Gráfico 3 Suma de funciones gaussianas que representa la mitad de una sección transversal del defecto interno

La línea mostrada en el gráfico 3 constituye la mitad de una sección transversal del defecto interno, la otra mitad se genera de manera similar pero con nodos que corresponden a posiciones por debajo de la línea media del defecto. Luego, ambas curvas son unidas para obtener una sección transversal del defecto con forma irregular y aleatoria como la que mostramos en el gráfico 4. Esta sección transversal del defecto interno fue obtenida mediante la superposición de diez funciones gaussianas para el perfil superior (línea continua) y la superposición de otras diez para el inferior (línea discontinua).

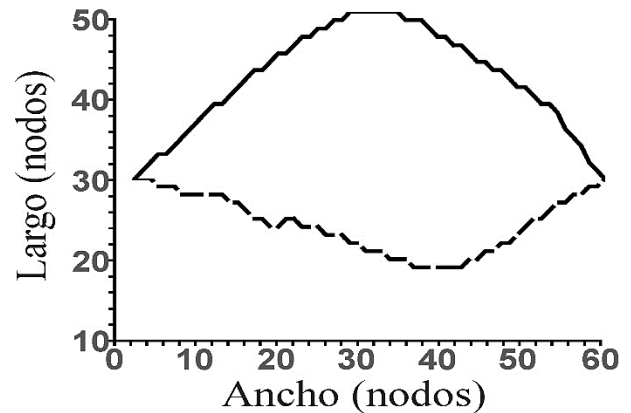


Gráfico 4 Sección transversal con forma irregular y aleatoria de un defecto subsuperficial simulado

En nuestro caso, la sección transversal mostrada en el gráfico 4 representa a la cara plana del defecto más cercana a la superficie del objeto, pero pudiera representar a cualquier otra cara o sección transversal. Luego, a cada posición (x,y) de la sección transversal defectuosa le asignamos un espesor que es determinado mediante una función gaussiana bidimensional para darle volumen al defecto. Esta función gaussiana también puede tener parámetros aleatorios e inclusive puede ser el resultado de la superposición de varias funciones de este tipo. Con el método propuesto obtenemos un defecto tridimensional con forma irregular y aleatoria como el mostrado en el gráfico 5.

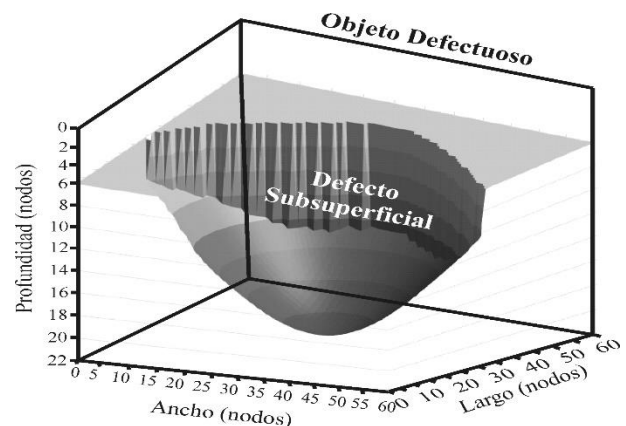


Gráfico 5 Simulación de un sólido semi-infinito con un defecto subsuperficial con forma irregular y aleatoria

Los nodos que se encuentran en el interior del defecto mostrado en el gráfico 5 son considerados nodos defectuosos, y por lo tanto les asignamos propiedades termofísicas correspondientes ese tipo material. Esto implica un conocimiento a priori del material defectuoso que esperamos encontrar en el interior del objeto. El desconocimiento de las propiedades del defecto causa desviaciones en su posición y dimensiones.

Una vez que tenemos la malla que representa al objeto con defectos internos irregulares podemos proceder a simular el proceso de inspección por termografía pulsada. Este proceso consiste en analizar la respuesta térmica superficial del objeto como función del tiempo después de ser irradiado con un pulso de calor. Analizando esta respuesta térmica es posible detectar defectos internos y determinar sus características tales como profundidad, espesor y forma.

Conclusiones

Presentamos un método para la simulación numérica de objetos opacos con defectos en su interior. A través del método propuesto generamos defectos subsuperficiales con forma irregular y aleatoria. Estos defectos son creados mediante una sección transversal irregular y una función gaussiana bidimensional.

La sección transversal del defecto es obtenida mediante la superposición de funciones gaussianas con valor esperado y ancho aleatorio que dan como resultado un contorno irregular, mientras que la gaussiana bidimensional es usada para darle volumen al defecto.

La asimetría de los defectos que generamos contribuye a modelar el tipo de defectos que podríamos encontrar realmente en el interior de los objetos durante su inspección.

Estas simulaciones numéricas de objetos defectuosos pueden ser empleadas en el modelado del proceso de inspección de objetos mediante técnicas termográficas no-destructivas. La información que proporcionan estas simulaciones permitirán el desarrollo de inspecciones termográficas no-destructivas que contribuyan a la obtención de diagnósticos más certeros y oportunos.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la Universidad de Guanajuato, la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado (DAIP), y el Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP).

Referencias

- [1] Rodríguez, L. A., Ensayos no destructivos de materiales empleados en obras civiles mediante termografía infrarroja, tesis, Celaya Gto; 2015.
- [2] Borja, F. A., Termografía infrarroja como ensayo no destructivo: detección de defectos en componentes aeroespaciales. Obtenido de <http://www.interempresas.net>, Centro de Tecnologías Aeronáuticas, 2005.
- [3] Maldague, X., Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive. New York: Wiley Interscience; 2001.
- [4] Marinneti, S., y Maldague X., Procesamiento de imágenes infrarrojas para la detección de defectos en materiales. Obtenido de http://objetos.univalle.edu.co/files/Procesamiento_de_imagenes_infrarrojas_para_la_deteccion_de_defectos_en_materiales.pdf; 2004.
- [5] A. S., "Infrared and Thermal Testing". In Nondestructive Handbook on Infrared Technology Vol. 3. USA: Handbook Series, X. Maldague technical and P. O. Moore eds. 3rd edición; 2001.

[6] Ramírez-Granados, J. C.; En J. C. Ramírez-Granados, Detección y Reconstrucción de Defectos Subsuperficiales en 3-D mediante el Análisis de Datos de Termografía Pulsada (págs. 148-165). León, Gto: Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., 2011.

[7] Tse, D. P., Smart engineering asset management laboratory. Obtenido de <http://www6.cityu.edu.hk/seam>; 2011. Bellavista, J & Renobell, V, (Coords.), Ciencia, tecnología e innovación en América Latina, Barcelona, Universitat de Barcelona, 1999, p 258