Type: PhD summary

Section: Image Processing and Imaging Techniques

Participant in the 5th Ed. Justiniano Casas Prize (2016)

Integration of Fringe Projection and 2D Digital Image Correlation for the measurement of 3D displacements and strains

Integración de Proyección de Franjas y Correlación Digital de Imágenes 2D para la medida de deformaciones y desplazamientos 3D

L. Felipe-Sesé,^{1,S} Francisco A. Díaz¹, Philip Siegmann²

¹ *Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Campus las Lagunillas, Universidad de Jaén, 23071, Jaén, Spain*

² *Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad de Alcalá, 28871, Alcalá de Henares, Madrid, Spain*

(*) E-mail: lfelipe@ujaen.es

S: SEDOPTICA member

DOI: 10.7149/OPA.50.1.49505

ABSTRACT:

In many engineering applications, the measurement of displacements maps in all three spatial directions over the surface of a loaded object is often required, such an example is, structural testing or manufacturing quality control. At present, for this proposes, typically 3-dimensional digital image correlation (3D-DIC) is often used. This technique employs two cameras acquiring images from different viewing angles of the object while it is deformed. The cameras have to be perfectly synchronized and calibrated for both: 3D reconstruction and for tracking each surface element while the deformation occurs. The calibration process of the technique requires acquiring a sequence of several images of a calibration object and a high amount of computational resources. Alternative techniques have been proposed to obtain 3D displacement maps by combining Fringe Projection (FP) with two-dimensional DIC (2D-DIC). The hybrid technique only requires one camera and a fringe projector. In this thesis it is presented a novel device that allows obtaining the maps of displacements in X-, Y- and Z- direction at the surface of an object during deformation. The system is based on a method that combines 2D-DIC and FP to obtain the in- and out-of-plane components of displacement during deformation. The device operates by acquiring only one image of the studied object at each deformation state desired to analyze during the total test, thereby allowing real time data acquisition. The goal of the presented work is that the device allows both: a precise perpendicular alignment respect to a flat reference surface, and a self-calibration (i.e. no calibration object is employed). Thus, a fringe calibration constant is estimated for each pixel as well as all the required parameters for the in-plane displacement correction. To illustrate the potential of the proposed device, a set of static and dynamic experiments have been conducted using hyperelastic materials. The maximum out-of-plane displacement achieved was 20 mm with an uncertainty of 0,023 mm and an in-plane displacement uncertainty of 0,0083 mm. Results have been compared with those obtained using a commercial three dimensional digital image correlation system showing a very high level of agreement.

Key words: Digital Image Correlation, Fringe Projection, Experimental Mechanics, 3D Strain measurement.

RESUMEN:

Diversas aplicaciones de ingeniería requieren la medida de desplazamientos las tres direcciones espaciales de un objeto sometido a cargas mecánicas, por ejemplo, en pruebas estructurales o en controles de calidad de fabricación. En la actualidad, se emplea comúnmente la técnica Correlación Digital de Imágenes (3D-DIC). Esta técnica utiliza dos cámaras que adquieren imágenes del objeto

que está siendo deformado desde diferentes ángulos de visión. Las cámaras deben estar perfectamente sincronizadas y calibradas para poder llevar a cabo la reconstrucción de formas en 3D y el seguimiento de la posición de cada elemento de la superficie del objeto mientras se produce la deformación. El proceso de calibración de esta técnica requiere de la adquisición de una secuencia de imágenes de un objeto de calibración y de una alta cantidad de recursos computacionales. En esta tesis se presenta un novedoso sistema que permite medir los desplazamientos en las direcciones X-, Y- y Z ocurridos en la superficie de un objeto sometido a deformación mediante una sola cámara. El método empleado se basa en combinar las técnicas 2D-DIC y FP para obtener los mapas de desplazamiento medidos en el plano y fuera de éste (3D). Éste sistema propuesto obtiene dichos resultados a partir de la adquisición de tan sólo una imagen por cada etapa de la deformación del objeto, lo que permite la adquisición de datos en tiempo real durante ensayos dinámicos. Uno de los intereses de esta investigación reside en que el sistema permite una alineación perpendicular precisa de la cámara con respecto a una superficie plana de referencia, y también permite la auto-calibración (no se emplea ningún objeto de calibración). Además, permite la determinación de una constante de calibración de proyección de franjas para cada píxel, así como todos los parámetros necesarios para la corrección de los desplazamientos medidos en el plano. Para ilustrar el potencial del sistema propuesto, se ha realizado una serie de experimentos estáticos y dinámicos. El mayor desplazamiento medido fuera de plano ha sido de 20 mm con una incertidumbre de 0,023 mm y de 0,0083 mm para la medida de desplazamientos en el plano. Los resultados se han comparado con los obtenidos empleando un sistema Correlación Digital de Imágenes 3D comercial, manifestando un nivel de concordancia muy alto..

Palabras clave: Correlación Digital de Imágenes, Proyección de Franjas, Medida de deformaciones 3D, Mecánica experimental.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] Felipe Sesé. "Integration of Fringe Projection and 2D Digital Image Correlation for the measurement of 3D displacements and strains". Universidad de Jaén. (2010)
<http://ruja.ujaen.es/handle/10953/107>
- [2] Sutton, M., Orteu, J. & Schreier, H. W., "Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements". New York: Springer Science+Business Media. (2009)
- [3] Pan, B., Xie, H., Guo, Z. & Hua, T., "Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation." Opt. Eng., **46**, p. 033601(2007)
<https://doi.org/10.1117/1.2714926>
- [4] Takeda, M. & Mutoh, K., "Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes." Appl. Opt., **22** 3977-3982 (1983)
<https://doi.org/10.1364/AO.22.003977>
- [5] Tay, C., Quan, C., Wu, T. & Huang, Y., "Integrated method for 3-D rigid-body displacement measurement using fringe projection." Opt. Eng., **43**, 1152-1159. (2004)
<https://doi.org/10.1117/1.1687728>
- [6] Siegmann, P., Álvarez-Fernández, V., Díaz-Garrido, F. & Patterson, E., "A simultaneous in- and out-of-plane displacement measurement method." Opt. Lett., **36**, 10-12. (2011)
<https://doi.org/10.1364/OL.36.000010>
- [7] Barrientos, B., Cerca, M., García-Marquez, C. & Hernández-Bernal, C., "Three-dimensional displacement fields measured in a deforming granular-media surface by combined fringe projection and speckle photography." J. Opt. A-Pure Appl. Op., **10**: 104027 (2008)
<https://doi.org/10.1088/1464-4258/10/10/104027>
- [8] Mares, C., Barrientos, B. & Blanco, A., "Measurement of transient deformation by color encoding." Opt. Express, **19**, 25712-25722. (2011)
<https://doi.org/10.1364/OE.19.025712>
- [9] Bing Pan, Kemao Qian, Huimin Xie and Anand Asundi "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review." Meas. Sci. Technol. **20** 062001(2009)
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001>
- [10] Heredia Ortiz, M. E. "Novel developments of moire techniques for industrial applications." Sheffield: University of Sheffield. (2004)

- [11] Ghiglia, D. & Pritt, M. "Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software." New York: Wiley&Blackwell. (1998)
- [12] Felipe-Sesé, L., Siegmann, P., Díaz, F. & Patterson, E. "Simultaneous in-and-out of-plane displacement measurements using fringe projection and digital image correlation." *Opt. Laser Eng.*, 2, 66–74. (2014)
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.07.025>
- [13] Felipe-Sesé, L., Siegmann, P., Díaz-Garrido, F. & Patterson, E. "Integrating fringe projection and digital image correlation for high quality measurements of shape changes." *Opt. Eng.* **53**:044106 (2014)
<https://doi.org/10.1117/1.OE.53.4.044106>
- [14] Xiaohua Tan, Yilan Kang, Eann Patterson, "An experimental study of the contact of a rounded rigid indenter with a soft material block." *J Strain Analysis*, **49** 112–121 (2014)
<https://doi.org/10.1177/0309324713496406>
- [15] Sebastian, C., Hack, E. & Patterson, E. "A approach to the validation of computational solid mechanics models for strain analysis." *J. Strain Analysis*, **48**, . 36-47. (2013)
<https://doi.org/10.1177/0309324712453409>

1. Introducción

Diversas aplicaciones de ingeniería requieren la medida de desplazamientos en las tres direcciones espaciales de un objeto sometido a cargas mecánicas, por ejemplo en pruebas estructurales o en controles de calidad de fabricación.

El objetivo principal de este trabajo [1] es la integración de las técnicas 2D-DIC y FP para la medición de desplazamientos 3D empleando una sola cámara. Para la definición de este objetivo, se desarrolló un estudio preliminar sobre los fundamentos, campos de aplicación, ventajas e inconvenientes de algunas de las técnicas ópticas más comúnmente empleadas en el ámbito de la mecánica experimental. Como resultado de esta investigación, se observó que 3D-DIC [2] es la única técnica que permite la medida de desplazamientos en el plano y fuera de éste (3D), además, presenta la ventaja adicional de que puede ser empleada en un amplio rango de aplicaciones, ya sean en condiciones estáticas o dinámicas. Esta técnica utiliza dos cámaras que adquieren imágenes del objeto que está siendo deformado desde diferentes ángulos de visión. Las cámaras deben estar perfectamente sincronizadas y calibradas para poder llevar a cabo la reconstrucción de formas en 3D y para el seguimiento de la posición de cada elemento de la superficie del objeto mientras se produce la deformación. El proceso de calibración de esta técnica requiere de la adquisición de una secuencia de imágenes de un objeto de calibración y de una alta cantidad de recursos computacionales. Esto implica un sensible aumento del coste del equipo, especialmente notable en el estudio de problemas dinámicos.

Por otra parte, 2D-DIC [3] y FP [4] son dos técnicas ampliamente conocidas caracterizadas por una gran aplicabilidad y sensibilidad. No obstante 2D-DIC se encuentra muy limitada al no poder estudiar elementos no planos y PF no ofrece tanta información valiosa en el aspecto de la mecánica al no ofrecer información sobre los acontecimientos que ocurren en el plano. Sin embargo, ambas poseen un montaje experimental muy parecido (una cámara dispuesta perpendicularmente a un plano de referencia). Por lo tanto, la integración de ambas técnicas de manera simultánea para la medida de desplazamientos en el plano y fuera de éste disminuiría el coste y la complejidad del montaje experimental y del procesado en comparación con 3D - DIC. La integración de 2D-DIC y FP permitiría solventar las restricciones que ambas técnicas presentan individualmente.

Estudios previos ponen de manifiesto la inexistencia de una metodología específica que consiga establecer la unión de 2D DIC y FP como una alternativa real a 3D DIC. No obstante, son varios los autores [5-8], que han explorado la unión de ambas técnicas, aunque no se han reportado resultados de medidas precisas en tres dimensiones que sean comparables a los obtenidos mediante otras técnicas. Así mismo, se han identificado dos aspectos generales que han limitado la integración de ambas técnicas. El primero de ellos es que 2D DIC precisa de un patrón de Speckle mientras que PF necesita de la proyectar un patrón de franjas sobre el elemento estudiado. Por tanto, para que la combinación de ambas técnicas, es preciso capturar ambos patrones en el mismo instante de tiempo. Una alternativa es la utilización de una cámara RGB con el fin de asociar cada uno de los patrones a un color. El segundo aspecto a tener en cuenta es que los desplazamientos en el plano medidos por 2D DIC están distorsionados por la forma del elemento a estudiar o la deformación fuera de plano experimentada por el

mismo. Este efecto ha sido minimizado por algunos autores empleando lentes telecéntricas [7], con el inconveniente de que éstas son costosas y voluminosas. El uso de lentes convencionales implica corregir los desplazamientos en el plano para evitar la distorsión anteriormente indicada. Sin embargo, pese a existir en la bibliografía estudios previos no se ha encontrado ninguna comparativa de los resultados combinando 2D DIC y PF con los obtenidos con otras técnicas.

En esta investigación se ha estudiado el montaje experimental necesario para la integración de ambas técnicas y poder procesar el patrón de franjas y de speckle por separado. Además, el desplazamiento medido en el plano por 2D-DIC requiere una corrección especial si no se han empleado lentes telecéntricas en la cámara. Por esto motivo, se ha realizado un análisis óptico basado en un modelo de lente pin-hole. El resultado es una relación matemática que permite la corrección de la distorsión de esos desplazamientos medidos por 2D-DIC.

Todo el sistema descrito debe ser calibrado y alineado perpendicularmente con respecto al plano de referencia. Debido a ello se ha desarrollado una metodología de calibración/alineación mediante el uso de un puntero de láser y de una plataforma de movimiento lineal micrométrico.

Finalmente, la integración de ambas técnicas ha sido validada experimentalmente y empleada en problemas de interés mecánico. En todos los casos los resultados se compararon con los obtenidos con 3D-DIC mostrando un alto nivel de concordancia, destacando el potencial de FP+2D-DIC como una alternativa de bajo coste a la técnica 3D-DIC.

2. Fundamentos

Correlación Digital de Imágenes 2D es una técnica que permite la determinación de los desplazamientos que sufre un elemento ensayado en el plano (x,y) [9]. Para ello recurre a la incorporación a la superficie del elemento de un patrón de pequeñas manchas aleatorias de alto contraste (denominado speckle) a la superficie del elemento. De esta manera, una pequeña porción de la imagen que posea ese patrón, con un nivel de gris medio característico, es difícilmente repetible en el resto de la imagen. En esta premisa se basa el procesamiento mediante Correlación Digital de Imágenes (DIC 2D). La técnica se basa en la captura de una imagen de referencia del elemento y seguidamente se realiza el ensayo, el cual imprimirá sobre dicho elementos unos desplazamientos en el plano (x,y) . De cada estado durante el proceso del ensayo se capturarán imágenes. Posteriormente, en la etapa de correlado, la imagen de referencia se divide en pequeñas porciones llamadas facetas de mismo tamaño $(2M+1) \times (2M+1)$, las cuales están asociadas al pixel central de cada faceta $p_1(x_0, y_0)$. Estas facetas, poseen un nivel de intensidad de gris característico. A continuación, el algoritmo elegido realizará una búsqueda de esa faceta alrededor del punto de mismas coordenadas pero en la siguiente imagen capturada $p_2(x_0, y_0)$. Si ha experimentado un desplazamiento, el centro de la faceta buscada se encontrará en otras coordenadas $p_2(x_1, y_1)$ (figura 1).

Figura 1. Procedimiento de procesamiento DIC 2D

De manera que se conocerá el desplazamiento en dirección x y en dirección y :

$$\Delta x = x_2 - x_1 \quad (1)$$

$$\Delta y = y_2 - y_1$$

Por otro lado, la proyección de franjas es una técnica óptica interferométrica de campo completo que permite determinar desplazamientos fuera de plano con la utilización de un proyector y una cámara [3],[10]. Para ello recurre a la proyección de un patrón de franjas con una distribución senoidal. El principio básico es la proyección de un patrón de franjas sobre una superficie de referencia o rejilla de paso p mediante un proyector. Estas franjas variarán senoidalmente en la dirección perpendicular a la franja proyectada, por lo que la distribución de intensidad (i,j) puede describirse de la siguiente manera; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

$$I(i,j) = A(i,j) + B(i,j)\cos(2\pi f + \phi(i,j)) \quad (2)$$

Donde A es la iluminación de fondo o ruido, B es la amplitud de la rejilla, f es la frecuencia del patrón proyectado y ϕ es la fase de la onda senoidal. Si se obtiene una imagen en la que el objeto de referencia haya variado su forma, la fase habrá variado, por lo que determinando la diferencia de fase se podrá conocer el movimiento fuera de plano desplazamiento que existe en ese pixel respecto a la imagen de referencia como muestra la figura 2.

Figura 2. Diagrama de la técnica de proyección de franjas

Este desfase puede ser calculado por dos métodos principalmente, el método de variación de fase o phase-shifting [10] y el análisis de las imágenes en dominio de la frecuencia mediante Fourier [3]. En ambos casos la fase extraída se presenta envuelta entre los valores $-\pi$ y π por lo que necesita un procesamiento de desenvelto conocido como unwrapping [11].

De este estudio se concluye que Correlación Digital de Imágenes y Proyección de Franjas son técnicas que miden desplazamientos de forma más versátil que las anteriormente mostradas pudiendo ser utilizadas en amplio rango de medidas, son capaces de ser empleadas en ambientes industriales, poseen unos costes de equipamiento relativamente bajos y pueden ser utilizados sobre cualquier tipo de elemento sin una complicada preparación del mismo.

Por tanto, partiendo de esta hipótesis inicial, resulta de interés estudiar ambas técnicas con el propósito de integrarlas para extender su uso a la medida de desplazamientos/deformaciones en 3D de forma simultánea, empleando una sola cámara. La integración satisfactoria de ambas técnicas constituiría una alternativa a la técnica de 3D DIC, con la consiguiente reducción en coste de los equipos al verse reducido el número de cámaras a una sólo lo que podría resultar de gran interés para el análisis de cierto tipo de aplicaciones, como es el caso de problemas dinámicos.

4. Metodología experimental

El set-up básico, véase Fig.3, consta de una cámara RGB perpendicular a una superficie de referencia y un proyector LCD dispuesto de manera oblicua con respecto al eje óptico de la cámara con el que se proyectan franjas verticales sobre una probeta previamente pintada con speckle. Para la separación de las franjas y el speckle en las imágenes capturadas se adopta un sistema de codificación de color, de tal forma que las franjas se proyectan en color azul mientras que el speckle se pinta en rojo sobre fondo blanco.

Fig.3. Esquema ilustrativo del set-up empleado para FP+2D-DIC

Para una buena sensibilidad de PF, la frecuencia de las franjas debe ser la mínima posible compatible con la resolución del proyector y de la cámara, de forma que intensidad de luz en la imagen tenga una distribución sinodal. Así mismo, las franjas deben ser proyectadas de manera oblicua con un valor de ángulo (α) tan alto como sea posible, a fin de garantizar que las franjas mantengan su frecuencia a lo largo de la superficie estudiada. En lo que respecta al speckle, el tamaño debe de ser del orden de entre 3 y 7 píxeles, estando limitado por la resolución de la cámara y la magnificación de la lente empleada.

La metodología adoptada consiste en capturar una imagen de referencia y seguidamente una por cada estado de deformación del objeto sometido a ensayo que se quiera estudiar. Las imágenes RGB capturadas pueden descomponerse en dos imágenes, una sensible al rojo (en que las franjas azules son visibles) y otra sensible al azul (en la que el speckle rojo es visible). Ambas imágenes son sometidas a un tratamiento de pre-procesado para homogeneizar el contraste. Seguidamente, las imágenes de proyección de franjas son procesadas utilizando método de Phase-Stepping o alternativamente el método Fourier Transform Profilometry. En estos métodos se mide el desfase entre las franjas, el cual codifica el desplazamiento relativo. Este desfase se encuentra modulado en una señal que oscila entre $-\pi$ y $+\pi$. Por tanto, es preciso implementar un proceso unwrapping. En la presente tesis se ha adoptado un proceso unwrapping guiado por mapa de calidad. Finalmente el mapa de fase demoludado es traducido a un mapa de desplazamientos fuera de plano.

Para llevar a cabo la técnica de Correlación Digital de Imágenes, se adopta un procedimiento de correlación cruzada. Los resultados de desplazamiento en el plano son obtenidos en píxeles, siendo necesaria una conversión a unidades de longitud mediante el factor denominado Magnificación Lateral (L).

Por otro lado, es preciso una metodología para la corrección de la distorsión en los desplazamientos medidos con 2D DIC como resultado de geometría del componente, y/o de la deformación fuera de plano. El método propuesto se basa en un modelo de lente simplificado (modelo pin-hole mostrado en Fig.4) consistente en una relación matemática (3) que permite corregir la distorsión de los desplazamientos en el plano a partir de los desplazamiento fuera de plano medidos mediante PF.

Fig.4. Ilustración mostrando el error inducido en 2D-DIC cuando la probeta experimenta un desplazamiento fuera de plano.

$$\begin{aligned}\Delta x &= L \left[\Delta x_{CCD} - x_{2,CCD} \frac{\Delta z_2}{z_0} - x_{1,CCD} \frac{\Delta z_1}{z_0} \right] \\ \Delta y &= L \left[\Delta y_{CCD} - y_{2,CCD} \frac{\Delta z_2}{z_0} - y_{1,CCD} \frac{\Delta z_1}{z_0} \right]\end{aligned}\quad (3)$$

Siendo Δx_{CCD} y Δy_{CCD} las medidas obtenidas empleando 2D-DIC, Δz la medida obtenida por PF y z_0 es la distancia del centro óptico de la lente utilizada al plano de referencia (z_0).

Para ello, es precisa una calibración así como de la alineación del sistema con respecto a una superficie de referencia. Como resultado de la calibración se obtienen dos factores, Kf y L, que permiten convertir en unidades de longitud los valores de fase y distancia en píxeles obtenidos por PF y 2D DIC respectivamente. Adicionalmente, es preciso determinar la distancia del centro óptico de la lente utilizada al plano de referencia (z_0). La implementación del método propuesto consiste en capturar una imagen inicial del plano de referencia a una distancia determinada, z_0 , con speckle y franjas superpuestas. Seguidamente, se desplaza el conjunto cámara-proyector una distancia, Δz , en la dirección perpendicular a la superficie de referencia, tomando una nueva imagen. Adicionalmente, mediante un emisor láser es posible alinear el conjunto cámara-proyector de tal forma que la cámara se encuentre perpendicular al plano de referencia. La metodología propuesta destaca por su simplicidad, si bien permite obtener una alta precisión en las medidas de desplazamiento. No obstante, es especialmente crítico garantizar que el plano del sensor se encuentre totalmente paralelo al plano de referencia, según el procedimiento de alineación propuesto [13].

Como conclusión cabe destacar la sencillez y robustez del procedimiento de calibración/alineación desarrollado, el cual permite obviar la utilización de lentes telecéntricas. No obstante, existen fuentes de error que es preciso controlar, como es el caso de la falta con el plano de referencia del conjunto cámara-proyector, o la precisión en el cálculo de la distancia z_0 y factores Kf y L, respectivamente.

6. Validación del método

En este sexto apartado se ha validado experimentalmente la integración de las técnicas FP y 2D DIC junto con el método de calibración/alineación propuesto. Esta validación se lleva a cabo mediante la realización ensayos en los que existen desplazamientos y deformaciones en tres dimensiones y comparando los resultados ofrecidos por el sistema FP+DIC con los obtenidos empleando la técnica 3D DIC [12,13]. El set-up generalmente empleado es el mostrado en la figura 5.

Fig 5. A) Montaje experimental utilizado para la calibration. B) Vista lateral mostrando el tornillo micrométrico que permite desplazamientos precisos en el eje z (z-DA). [13]

Los dos primeros ensayos consisten en la medición de los desplazamientos de sólido rígido en un objeto plano cuya una superficie presentaba una ligera inclinación respecto al plano del sensor de la cámara [12]. En un primer ensayo el desplazamiento es horizontal y en un segundo ensayo es vertical. Debido a que los diferentes puntos de la superficie tienen diferente magnificación óptica en el sensor de la cámara lo que provocará un error en el procesado de 2D DIC.

El siguiente ensayo es la compresión controlada de una esfera hueca de caucho contra un orificio circular de menor diámetro, por lo que la esfera experimenta un gran desplazamiento fuera de plano a través del orificio. Al existir forma y deformación fuera de plano, 2D-DIC presentará unos resultados distorsionados que deben ser corregidos.

Finalmente un último ensayo consiste en la deformación fuera de plano de una membrana de silicona que es plana en su estado inicial. Por lo que, debido a esa deformación fuera de plano, los resultados de las medidas de 2D-DIC también deben ser corregidos.

Con fines ilustrativos se muestra a continuación los resultados del ensayo de la compresión de la esfera de caucho en la figura 6.

Los resultados se han comparado con los obtenidos mediante 3D-DIC mostrando un alto nivel de concordancia, resultando diferencias de menos de 5% representando diferencias similares al tamaño del pixel de la cámara empleada. Estos resultados ponen de manifiesto la precisión del método y el modelo desarrollado, concluyendo que el método propuesto ha cumplido las expectativas al corregir los resultados distorsionados de 2D DIC y ser comparable con 3D DIC

Fig 6. A) Desplazamientos en dirección vertical obtenidos durante el ensayo de la esfera de caucho para las técnicas DIC 3D, DIC2D y FP+2D DIC. B) Grafica de los desplazamientos medidos a lo largo de la línea discontinua mostrada en los mapas de desplazamiento [12]

7. Aplicaciones de la técnica FP+DIC a problemas de grandes desplazamientos.

En este apartado la metodología desarrollada se ha aplicado al estudio de problemas de grandes desplazamientos. El objetivo es demostrar que la técnica presenta una alternativa real al uso de 3D-DIC en aplicaciones reales de interés científico e industrial en las que los elementos se deforman en tres dimensiones.

Para ello, se han analizado los desplazamientos debidos a la compresión mediante una cuña (indentación) en un bloque (60x60x20mm) de silicona transparente en condiciones estáticas y dinámicas, así como el comportamiento a impacto de una esfera de caucho de 60mm de diámetro. Adicionalmente, se ha

implementado un algoritmo para determinar las deformaciones unitarias en la superficie del elemento estudiado utilizando el tensor de Green-Lagrange [14].

Los ensayos llevados a cabo sobre el bloque de silicona transparente presentan la complejidad de la aplicación del patrón de speckle para soportar las grandes deformaciones a la que es sometido sin que se deteriore y permitiendo un buen contraste tanto del patrón de speckle como el patrón de franjas proyectado. En el ensayo estático se llevaron a cabo indentaciones a 2, 4, 6 y 9mm mientras que en el ensayo dinámico se realizó la indentación de 6mm a una velocidad de aplicación de 400mm/s. Para registrar esa deformación, las imágenes fueron capturadas a una velocidad de 800 fps.

Por otro lado, el ensayo de la esfera de caucho presenta una ligera complejidad para llevar a cabo el proceso de calibración dado que no existe de necesaria superficie plana. Este problema es solucionado mediante la disposición delante de la esfera de una superficie plana sobre la que se realiza la calibración, tras lo que se puede retirar y proceder con el ensayo. Dicho ensayo consistía en la aplicación de una compresión de 12,5mm de la esfera a una velocidad de 500mm/s. La tasa de captura de las imágenes fue fijada a 500 fps. Los resultados los ensayos se han comparado con los obtenidos mediante 3D DIC y simulaciones numéricas empleando técnicas de descomposición de imágenes [15].

Por motivos ilustrativos se muestran a continuación los resultados de los desplazamientos medidos en el bloque de silicona cuando es indentado cuasiestáticamente 9mm en la figura 7 y los resultados de los desplazamientos de la esfera de caucho cuando es comprimida a alta velocidad en la figura 8.

Fig 7. Ilustración mostrando los resultados para los desplazamientos medidos en direcciones Y, X- y Z- cuando el bloque de silicona es indentado 9mm y obtenidos empleando el sistema de DIC 3D de la empresa Dantec (A, B, C) la técnica propuesta FP+2D-DIC (D, E, F) y con el sistema de DIC 3D de Correlated Solutions (G,H,I). J, K y L muestran el perfil de desplazamientos en direcciones Y-, X- y Z a lo largo de la línea discontinua.

Fig. 8 A) Forma de la esfera de caucho antes de la compresión B),C),D) Desplazamientos en las direcciones Z-, X- e Y- en el instante de máxima compresión E),F) Perfiles de desplazamiento a lo largo de la línea discontinua en C y D respectivamente

Se han empleado técnicas de comparación mediante la novedosa técnica de descomposición de imágenes. En todos los casos muestran un alto nivel de concordancia, con errores de desplazamiento inferiores a 2%. Adicionalmente se ha llevado a cabo ensayos en alta velocidad donde la disminución del coste del set up empleado comparado con el necesario para llevar a cabo 3D DIC es considerable. No obstante, los desplazamientos fuera de plano presentan ruido de alta frecuencia debido principalmente a que patrón de speckle afecta a la resolución de las franjas.

8. Conclusiones

Tras lo descrito en los anteriores capítulos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Se ha desarrollado un sistema óptico de medida de desplazamientos en las 3 direcciones espaciales mediante la combinación de las técnicas de PF y 2D-DIC. Este sistema posee las siguientes características:

- Permite la corrección de los desplazamientos medidos en el plano mediante 2D-DIC los cuales están distorsionados debido a los desplazamientos fuera de plano (siempre que no se utilice lentes telecéntricas).
- Precisa de un proceso de alineación y calibración respecto a una superficie plana.
- El sistema completo es compacto, portátil y ampliamente adaptable a las necesidades específicas de diferentes ensayos.
- Permite realización de ensayos dinámicos sin interrupciones.
- El sistema completo representa una sensible disminución del coste respecto a la principal alternativa para la medida de desplazamientos dentro y fuera de plano que es 3D-DIC.

Adicionalmente se han desarrollado los algoritmos de procesamiento de imágenes necesarios para extraer la información de los desplazamientos así como de las deformaciones unitarias de las imágenes adquiridas por el sistema óptico.

Además, se ha desarrollado un procedimiento para la necesaria alineación y calibración del sistema que permite obtener resultados veraces y de alta resolución de manera sencilla y robusta.

El sistema ha sido empleado para la medida de desplazamientos en tres dimensiones en diferentes ensayos comparándolo con otras técnicas ópticas y numéricas que validan los resultados obtenidos por él y muestran su capacidad de resolución, rango de medida y capacidad de medida en alta velocidad.

Finalmente, también se han detectado diversas líneas sobre las que se recomienda seguir trabajando. Una de ellas es el estudio de la disminución del ruido en los desplazamientos fuera de plano para disminuir la incertidumbre de su medida. Otro aspecto sobre el que es interesante seguir trabajando es la realización de un sistema de calibración y alineación aún más sencillo que facilite su utilización cuando el elemento estudiado no sea plano. Finalmente, se seguirá trabajando en la mejora de la comparativa de resultados de dos o más técnicas en ensayos dinámicos con el objetivo de analizar las diferencias a lo largo del tiempo y no en determinadas situaciones puntuales.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo gracias al apoyo económico de la Junta de Andalucía a través de la CONSEJERÍA DE INNOVACIÓN, CIENCIA Y EMPRESA y su programa de Formación de personal investigador y docente en áreas de conocimiento consideradas deficitarias.