

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE TEXTURAS SUPERFICIALES PARA SEGUIMIENTO DE MOVIMIENTOS ESTRUCTURALES A TRAVÉS DE LA IMAGEN

J. I. García Santos, M. B. Ferrer Crespo

Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías (IUFACyT),
Universidad de Alicante, Alicante, España

RESUMEN

La monitorización del movimiento en estructuras existentes es una tarea fundamental en los ámbitos de la conservación, el mantenimiento y la seguridad. La creciente digitalización de los procesos de inspección ha impulsado el uso de técnicas basadas en imagen debido a su carácter no invasivo, su bajo coste y su capacidad para obtener medidas a distancia sin interferir en la estructura. Un ejemplo representativo es el experimento realizado en la pasarela peatonal de Elche, donde se midió el desplazamiento vertical mediante una diana circular observada en perspectiva. La proyección elíptica permitió localizar el centro con precisión subpíxel y reconstruir la historia temporal del movimiento. El registro se efectuó en condiciones reales de servicio y a una distancia considerable, validando la metodología mediante comparación con un radar interferométrico de alta precisión. La coincidencia en la frecuencia principal de vibración y un error relativo inferior al 10 % confirman la aplicabilidad de estas técnicas en monitorización estructural.

No obstante, el uso de dianas requiere acceso físico a la estructura, lo que limita su aplicación en elementos elevados, zonas de difícil acceso o infraestructuras en servicio continuo. Para avanzar hacia soluciones completamente no invasivas, se plantea el uso de la textura natural de la superficie como referencia para el seguimiento del movimiento. En este contexto, la correlación digital de imágenes (DIC) es una técnica ampliamente utilizada, aunque su precisión depende de la textura del material de la estructura y de las condiciones de iluminación y enfoque. Estudios recientes han mostrado que variaciones en la intensidad y orientación de la luz, o niveles moderados de desenfoque, pueden incrementar el error de localización, especialmente cuando la textura es débil o poco contrastada. Comprender estos efectos es esencial para garantizar la fiabilidad del método en escenarios reales.

En esta línea, se presenta un análisis estadístico de texturas naturales con el fin de evaluar su idoneidad como objetivo de seguimiento sin marcadores. Se han analizado superficies de hormigón con distintas configuraciones de acabado, calculando más de treinta descriptores texturales, incluyendo matrices de co-ocurrencia (GLCM), patrones locales binarios (LBP) y medidas globales de contraste, energía y diversidad tonal. La relación entre estos descriptores y el error DIC se estudió mediante correlaciones de Spearman, pruebas no paramétricas, análisis de componentes principales (PCA) y modelos de regresión. Los resultados muestran que ciertos parámetros (—como la diversidad de niveles de gris, representada mediante un descriptor denominado Niveles Únicos, o la entropía local—) están

asociados de forma consistente a la precisión del seguimiento. Este análisis permite anticipar el comportamiento de una textura antes de medir y seleccionar zonas adecuadas para el seguimiento en estructuras reales.

Estos resultados abren la puerta al desarrollo de sistemas markerless aplicables a estructuras existentes, donde la propia superficie actúe como referencia de seguimiento. La metodología constituye un paso hacia técnicas basadas en imagen autónomas, de bajo coste y sin intervención física, facilitando nuevas posibilidades de inspección a distancia y monitorización continua.

PALABRAS CLAVE: monitorización estructural, técnicas basadas en imagen, DIC, textura superficial, seguimiento sin marcadores.

1. INTRODUCCIÓN

La monitorización del movimiento en estructuras existentes constituye una herramienta fundamental en el ámbito de la inspección, conservación y evaluación de la seguridad estructural. En elementos ligeros, como pasarelas peatonales, puentes de pequeña luz o estructuras esbeltas, la acción dinámica asociada al uso habitual puede generar desplazamientos y vibraciones que, aun sin comprometer la estabilidad global, afectan al confort de los usuarios y pueden ser indicativos de un comportamiento estructural no deseado. La caracterización precisa de estos movimientos resulta, por tanto, esencial tanto en fase de diagnóstico como en tareas de seguimiento y mantenimiento.

Tradicionalmente, la medición de desplazamientos estructurales se ha realizado mediante sensores de contacto, como acelerómetros, extensómetros o transductores de desplazamiento. Aunque estos sistemas ofrecen una elevada precisión, presentan limitaciones importantes en situaciones reales, especialmente cuando el acceso al punto de medida es complejo, cuando se desea evitar la instalación de instrumentación permanente o cuando se requiere una solución rápida y no invasiva. En este contexto, las técnicas basadas en imagen han adquirido un interés creciente como alternativa no invasiva y de fácil despliegue, al permitir la medición del movimiento a distancia, sin contacto físico con la estructura y con un coste relativamente reducido [1].

Un ejemplo representativo de este enfoque es la medición del movimiento estructural mediante el seguimiento de dianas artificiales. En trabajos previos, se ha demostrado que el seguimiento de una diana circular observada en perspectiva permite reconstruir con precisión subpíxel la historia temporal del desplazamiento, incluso en condiciones reales de servicio y a distancias elevadas [2]. Este tipo de metodología ha sido validado experimentalmente mediante comparación con sistemas de referencia de alta precisión, como radares interferométricos, mostrando una buena concordancia tanto en frecuencia como en amplitud del movimiento. No obstante, el uso de dianas requiere acceso físico a la estructura para su instalación, lo que limita su aplicabilidad en elementos elevados, zonas de difícil acceso o infraestructuras en servicio continuo.

Con el objetivo de avanzar hacia sistemas de monitorización completamente no invasivos, surge la necesidad de prescindir de marcadores artificiales y utilizar directamente la información visual proporcionada por la propia superficie de la estructura. En este contexto, la correlación digital de

imágenes (Digital Image Correlation, DIC) [3,4] se presenta como una técnica especialmente atractiva, ya que permite estimar desplazamientos a partir del seguimiento de patrones texturales naturales presentes en la superficie del material. Sin embargo, la precisión de la DIC depende de forma crítica de las características de dicha textura, así como de factores externos como la iluminación, el enfoque o la resolución de la imagen.

Este trabajo se centra en el análisis estadístico de texturas superficiales con el fin de evaluar su idoneidad como referencia para el seguimiento del movimiento estructural sin el uso de marcadores. A partir del estudio de diferentes superficies de hormigón y del análisis de múltiples descriptores texturales, se investiga la relación entre las propiedades estadísticas de la textura y el error asociado a la medición mediante DIC. El objetivo último es contribuir al desarrollo de metodologías de monitorización estructural basadas en imagen que sean robustas, autónomas y aplicables en condiciones reales, utilizando exclusivamente la información visual existente en la estructura.

2. DESARROLLO / METODOLOGÍA

En este apartado se describe la metodología empleada para el seguimiento del movimiento estructural mediante técnicas basadas en imagen, así como el procedimiento desarrollado para evaluar la idoneidad de las texturas superficiales como referencia de seguimiento sin marcadores. En primer lugar, se presenta el enfoque general adoptado para la medición del desplazamiento a partir de imágenes, y a continuación se detalla el análisis estadístico de texturas y su relación con el error asociado a la correlación digital de imágenes.

2.1. Metodología general basada en la imagen

La metodología empleada en este trabajo se basa en el uso de secuencias de imágenes para la estimación del movimiento estructural a partir del análisis del desplazamiento aparente de patrones visibles en la superficie de la estructura. Este enfoque permite realizar medidas sin contacto físico, utilizando cámaras convencionales y evitando la instalación de instrumentación sobre el elemento estructural, lo que resulta especialmente ventajoso en situaciones de difícil acceso o en estructuras en servicio.

El procedimiento general consiste en la adquisición de imágenes de la estructura durante su estado de funcionamiento, bajo condiciones reales de iluminación y observación. A partir de dichas imágenes, se seleccionan regiones de interés en la superficie que contienen información visual suficiente para ser seguidas a lo largo del tiempo. El movimiento se obtiene mediante la comparación de estas regiones entre imágenes consecutivas, permitiendo reconstruir la evolución temporal del desplazamiento en el plano de la imagen.

En trabajos previos, este tipo de técnicas se ha aplicado con éxito al seguimiento de dianas artificiales, diseñadas específicamente para facilitar su detección y localización con alta precisión. En particular, el uso de dianas circulares observadas en perspectiva ha permitido estimar el desplazamiento estructural mediante el ajuste geométrico de su proyección elíptica, alcanzando precisiones subpíxel y validándose frente a sistemas de referencia de alta exactitud [2]. No obstante, la necesidad de instalar estos marcadores limita la aplicabilidad del método en escenarios reales, especialmente cuando se pretende minimizar la intervención sobre la estructura.

Con el fin de superar esta limitación, el presente trabajo adopta un enfoque orientado al uso de la información visual proporcionada por la propia superficie del material, sin recurrir a marcadores artificiales. Para ello, se emplea la correlación digital de imágenes (Digital Image Correlation, DIC) como técnica de seguimiento [3,4], aprovechando los patrones texturales naturales presentes en la superficie estructural. En este contexto, la calidad y características de la textura adquieren un papel determinante en la precisión de la medición, ya que condicionan la estabilidad del proceso de correlación y la fiabilidad del desplazamiento estimado.

La metodología general descrita constituye la base sobre la que se desarrolla el análisis posterior, centrado en la caracterización estadística de las texturas superficiales y en la evaluación de su influencia sobre el error asociado a la medición mediante DIC. En la siguiente subsección se detalla el procedimiento seguido para dicho análisis, así como los descriptores y herramientas estadísticas empleadas.

2.2. Análisis estadístico de texturas y evaluación del error DIC

El análisis estadístico de las texturas superficiales se plantea como una etapa fundamental para evaluar su idoneidad como referencia de seguimiento en técnicas de correlación digital de imágenes. Dado que la precisión del desplazamiento estimado mediante DIC depende de la calidad de la información visual disponible, resulta necesario establecer una relación cuantitativa entre las características estadísticas de la textura y el error asociado al proceso de correlación.

En este trabajo se han analizado diferentes superficies de hormigón con distintas configuraciones de acabado, seleccionadas por su representatividad en estructuras reales. A partir de imágenes adquiridas bajo condiciones controladas, se han definido regiones de interés sobre la superficie y se ha evaluado el comportamiento de la DIC frente a desplazamientos conocidos. El error de medición se ha cuantificado a partir de la diferencia entre el desplazamiento impuesto y el desplazamiento estimado mediante el proceso de correlación, considerando tanto el error medio como la dispersión de los resultados.

Para caracterizar las propiedades de las texturas analizadas, se han calculado diversos descriptores estadísticos, abarcando tanto medidas globales como descriptores locales. Entre ellos se incluyen parámetros derivados de matrices de co-ocurrencia de niveles de gris (GLCM) [5], patrones locales binarios (Local Binary Patterns, LBP) [6] y medidas globales relacionadas con el contraste, la energía y la diversidad tonal. Estos descriptores permiten capturar diferentes aspectos de la textura, como la variabilidad espacial, la repetitividad de patrones o la distribución de intensidades.

La relación entre los descriptores texturales y el error asociado a la DIC se ha estudiado mediante un conjunto de herramientas estadísticas complementarias. En primer lugar, se han empleado coeficientes de correlación no paramétricos, con el fin de identificar tendencias monótonas entre las variables sin asumir relaciones lineales. Posteriormente, se ha aplicado un análisis de componentes principales (Principal Component Analysis, PCA) para reducir la dimensionalidad del conjunto de descriptores y analizar las combinaciones de variables que concentran la mayor parte de la variabilidad relevante de la textura. Finalmente, se han explorado modelos de regresión con el objetivo de evaluar la capacidad predictiva de determinados descriptores respecto al error de medición.

Este enfoque permite no solo identificar qué características texturales están más estrechamente relacionadas con la precisión de la DIC, sino también anticipar el comportamiento de una superficie antes de realizar la medición. En el presente trabajo, esta metodología se ha aplicado sobre superficies de hormigón con distintos acabados, seleccionadas por su representatividad respecto a materiales habitualmente presentes en elementos estructurales reales. De este modo, el análisis estadístico de texturas se plantea como una herramienta previa de selección de zonas de seguimiento, orientada a mejorar la fiabilidad y robustez de los sistemas de monitorización estructural basados en imagen en aplicaciones reales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados del análisis estadístico de texturas y su relación con la precisión de seguimiento mediante DIC. El objetivo es identificar patrones y descriptores que permitan anticipar, a partir de la imagen, si una superficie es adecuada como referencia de seguimiento sin marcadores. A modo ilustrativo, en la Figura 1 se muestran ejemplos de superficies con diferentes características texturales (mayor y menor variabilidad tonal y espacial), que ayudan a interpretar los resultados cuantitativos expuestos a continuación.

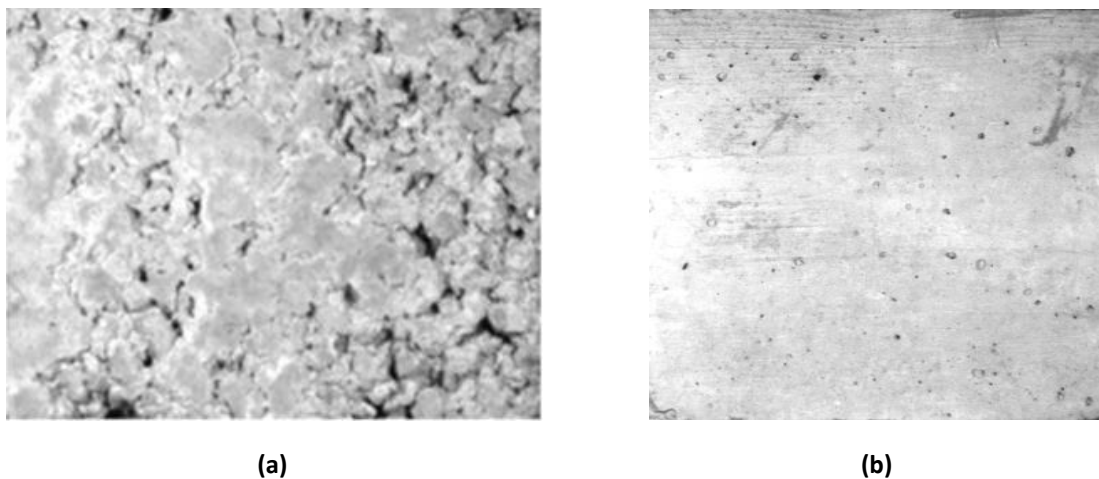


Figura 1. Ejemplos de superficies estructurales con diferentes características texturales. La variabilidad espacial y tonal de la textura influye directamente en la calidad del seguimiento del movimiento mediante técnicas basadas en imagen, en aplicaciones sin marcadores: **(a)** Ejemplo de zona con textura “rica”. **(b)** Ejemplo de zona con textura pobre. **Fuente:** Elaboración propia del banco de texturas experimental

3.1. Influencia individual de los descriptores texturales sobre el error DIC

El primer nivel de análisis se abordó desde un enfoque univariante, evaluando la relación entre cada descriptor textural y el error de seguimiento asociado al proceso de correlación. Para ello se emplearon correlaciones de Spearman y contrastes no paramétricos, adecuados para distribuciones no necesariamente normales y para relaciones no estrictamente lineales. El conjunto de variables analizadas incluye descriptores derivados de GLCM, LBP y medidas globales de contraste y diversidad tonal.

Los resultados muestran que la calidad de una textura como objetivo de seguimiento depende de la combinación de variabilidad tonal, presencia de patrones locales diferenciados y adecuada distribución espacial de intensidades en el plano de imagen. En particular, los descriptores asociados a la diversidad de niveles de gris y a la complejidad local tienden a mostrar relaciones más consistentes con la precisión del seguimiento. Este comportamiento es coherente con el hecho de que las superficies con mayor información visual ofrecen patrones más estables para el algoritmo de correlación frente a pequeñas perturbaciones, ruido o cambios leves de iluminación.

De forma consistente, destacan dos tipos de información: (i) la diversidad de niveles de gris, representada mediante el descriptor Niveles Únicos, y (ii) la complejidad local, capturada por métricas basadas en LBP, en particular su entropía. En términos prácticos, ambos aspectos se asocian a texturas con mayor complejidad tonal y local, que tienden a proporcionar patrones más estables para la correlación y, por tanto, un seguimiento más robusto.

3.2. Análisis multivariante mediante componentes principales (PCA)

Con el objetivo de identificar patrones globales en el comportamiento de las texturas y reducir la dimensionalidad del conjunto de descriptores, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA) sobre las variables texturales consideradas [7]. Esta técnica transforma el conjunto original de variables correlacionadas en un nuevo sistema de componentes ortogonales (PC1, PC2, etc.), ordenadas según la varianza que explican.

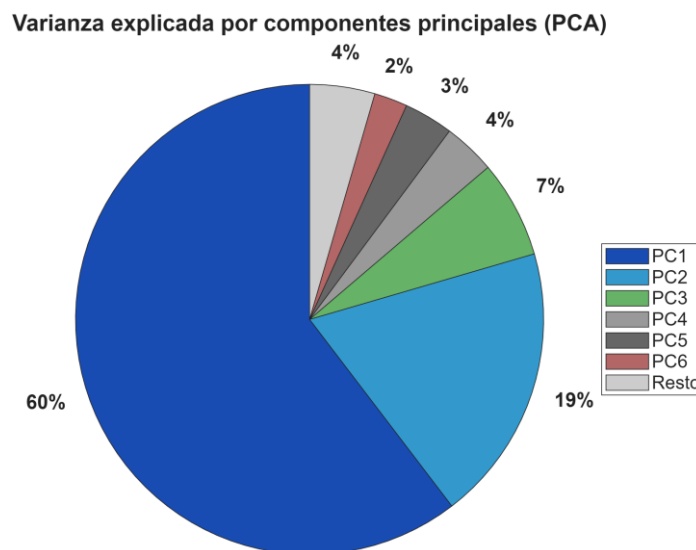


Figura 2. Porcentaje de varianza explicada por las componentes principales (PCA).

La Figura 2 muestra la varianza explicada por cada componente principal. Se observa que la primera componente (PC1) concentra aproximadamente el 60 % de la variabilidad total, mientras que la segunda (PC2) aporta en torno al 19 %. En conjunto, las dos primeras componentes explican cerca del 80 % de la varianza, lo que indica que el comportamiento textural relevante puede describirse adecuadamente mediante un espacio bidimensional reducido. Este resultado indica que una parte muy significativa de la información contenida en los descriptores originales puede resumirse sin pérdida sustancial en un número reducido de variables sintéticas. En términos prácticos, ello permite

interpretar la textura mediante unos pocos ejes dominantes y facilita el análisis posterior de su relación con el error DIC.

Desde el punto de vista interpretativo, PC1 se asocia principalmente con descriptores que capturan la diversidad tonal y la riqueza de información local de la textura. En particular, variables como Niveles Únicos de gris y la entropía derivada de los patrones locales binarios (LBP Entropía) presentan cargas elevadas en esta componente. Esto sugiere que PC1 representa una dimensión vinculada a la complejidad y variabilidad interna de la superficie.

Por su parte, PC2 recoge variaciones más relacionadas con la organización espacial y la distribución estructural de la textura, incluyendo parámetros derivados de matrices de co-ocurrencia (GLCM) y medidas globales de contraste. Esta segunda dimensión permite diferenciar texturas que, aun teniendo una diversidad tonal similar, presentan distinta regularidad o patrón espacial.

La clara dominancia de PC1 y PC2 refuerza la idea de que la calidad de una textura como referencia de seguimiento no depende de un único descriptor aislado, sino de combinaciones estructuradas de características estadísticas. En particular, la fuerte presencia de Niveles Únicos y LBP Entropía en las componentes dominantes es coherente con los resultados univariantes expuestos en el apartado anterior.

3.3. Agrupamiento de texturas y clasificación de su idoneidad

Una vez identificadas las componentes principales dominantes, se analizó la distribución de las probetas en el espacio bidimensional definido por PC1 y PC2, con el fin de evaluar la relación entre la estructura textural global y el error de seguimiento.

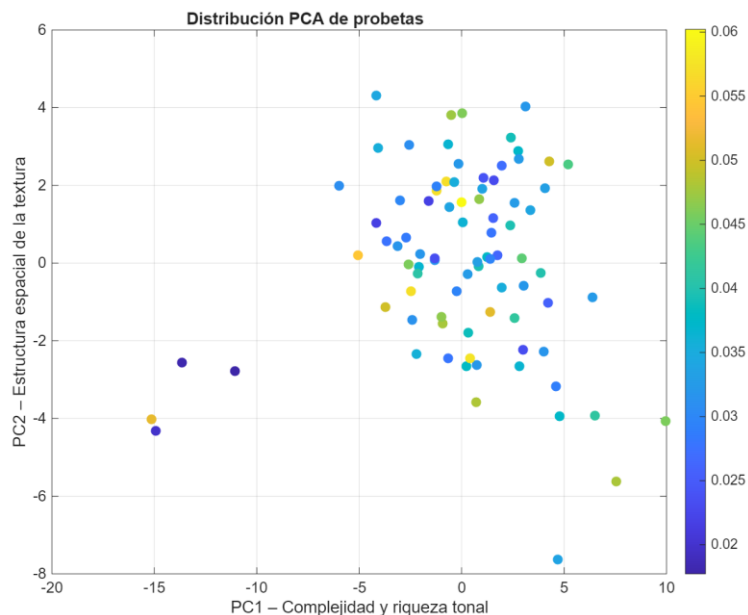


Figura 3. Representación de las probetas en el plano definido por las dos primeras componentes principales (PC1 y PC2) con escala de color que indica el error DIC asociado a cada muestra

La Figura 3 representa cada superficie analizada en el plano PC1–PC2, donde el eje horizontal (PC1) está asociado principalmente a la complejidad tonal de la textura, mientras que el eje vertical (PC2) recoge variaciones relacionadas con la estructura espacial y la organización interna del patrón superficial. La escala de color indica el valor del error DIC asociado a cada probeta.

Se observa que las superficies con menor error tienden a concentrarse en regiones del plano caracterizadas por valores intermedios o elevados de PC1, lo que es coherente con la importancia previamente detectada de descriptores como Niveles Únicos y LBP Entropía. Por el contrario, las superficies con menor diversidad tonal o menor complejidad local tienden a situarse en zonas donde el error presenta valores superiores.

No obstante, se identifican tres muestras situadas en la zona inferior izquierda del plano (valores bajos de PC1 y PC2) que presentan errores reducidos pese a mostrar menor complejidad tonal y estructural según los descriptores considerados. Este comportamiento sugiere que, aunque la tendencia general vincula mayor variabilidad textural con menor error, pueden existir configuraciones específicas cuya regularidad favorezca la estabilidad del proceso de correlación en determinadas condiciones experimentales. Asimismo, el error de seguimiento no depende exclusivamente de la textura, sino también de factores asociados al movimiento y a la adquisición de imagen, como la amplitud del desplazamiento, la relación señal-ruido o la estabilidad de iluminación. Estos casos ponen de manifiesto que la relación entre estructura estadística y precisión de la DIC no es estrictamente monótona, sino que responde a la interacción entre propiedades texturales y condiciones dinámicas de medición.

Esta representación permite visualizar de forma integrada cómo combinaciones específicas de características texturales influyen en la precisión del seguimiento. En particular, la separación de muestras en distintas zonas del plano permite identificar agrupaciones con comportamientos diferenciados frente al error DIC, así como reconocer casos singulares que no siguen la tendencia general. Más allá del análisis univariante, el plano definido por PC1 y PC2 actúa como un mapa sintético de idoneidad textural, facilitando la interpretación conjunta de los descriptores y la identificación preliminar de superficies potencialmente adecuadas como referencia de seguimiento sin marcadores.

3.4. Modelización predictiva del error

Con el objetivo de integrar la información proporcionada por los distintos descriptores texturales en un marco cuantitativo unificado, se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple orientado a estimar el error asociado al proceso de correlación digital de imágenes en función de parámetros estadísticos de la textura.

El modelo final, obtenido mediante un procedimiento de selección progresiva de variables, permitió identificar un subconjunto reducido de descriptores con capacidad explicativa significativa. Entre ellos destacan aquellos relacionados con la diversidad tonal y la entropía local, lo que refuerza los resultados obtenidos en el análisis individual y en la reducción dimensional previa. Esta coincidencia metodológica aporta coherencia al conjunto del estudio y sugiere que determinadas características texturales desempeñan un papel estructural en la estabilidad del proceso de correlación.

La convergencia entre los resultados del análisis univariante, la estructura revelada por el PCA y las variables seleccionadas por el modelo de regresión refuerza la consistencia interna del estudio. No se

trata de asociaciones aisladas, sino de patrones recurrentes que aparecen bajo enfoques estadísticos complementarios.

Desde el punto de vista interpretativo, el modelo evidencia que superficies con mayor riqueza tonal y mayor variabilidad espacial tienden a generar estimaciones más robustas del desplazamiento, reduciendo la sensibilidad del algoritmo frente a pequeñas variaciones de iluminación o ruido. Por el contrario, texturas homogéneas o con bajo contraste presentan una mayor propensión a errores de localización, lo que limita su idoneidad como referencia de seguimiento sin marcadores.

Aunque el modelo propuesto no pretende constituir una herramienta predictiva universal, sí permite establecer criterios objetivos para la evaluación previa de superficies reales antes de su utilización en tareas de monitorización estructural. En este sentido, el enfoque desarrollado no solo describe el comportamiento observado en las probetas analizadas, sino que propone un procedimiento transferible a otros escenarios experimentales o estructurales.

Cabe señalar que la capacidad explicativa del modelo depende del rango de variabilidad textural considerado y de las condiciones experimentales bajo las que se adquirieron las imágenes. No obstante, los resultados obtenidos demuestran que es posible anticipar, al menos parcialmente, la precisión del seguimiento a partir de métricas estadísticas de la imagen, lo que constituye un avance significativo hacia sistemas de monitorización completamente basados en imagen y sin intervención física sobre la estructura.

El conjunto del procedimiento desarrollado integra la caracterización estadística de la textura, su análisis multivariante y la modelización predictiva del error como secuencia metodológica para la evaluación previa de superficies en aplicaciones de seguimiento sin marcadores.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado la influencia de las características estadísticas de la textura superficial en la precisión del seguimiento del movimiento estructural mediante correlación digital de imágenes. Los resultados obtenidos confirman que la textura del material constituye un factor determinante en la calidad de la medición y que no todas las superficies ofrecen el mismo comportamiento frente al proceso de correlación.

El análisis individual de descriptores y la posterior reducción dimensional mediante análisis de componentes principales han permitido identificar patrones estructurales en la información textural. En particular, se ha comprobado que un número reducido de componentes principales concentra la mayor parte de la variabilidad de las texturas analizadas, lo que evidencia que la complejidad estadística del problema puede representarse mediante un conjunto limitado de variables sintéticas.

Desde el punto de vista cuantitativo, los resultados muestran que descriptores asociados a la diversidad tonal y a la entropía local presentan una relación consistente con el error de medición, lo que permite anticipar la idoneidad de una superficie como referencia de seguimiento sin marcadores. Esta capacidad predictiva resulta especialmente relevante en aplicaciones reales, donde el acceso a la estructura es limitado y no es posible intervenir sobre su superficie mediante la instalación de dianas artificiales.

Asimismo, la combinación de análisis exploratorio, técnicas de agrupamiento y modelos de regresión proporciona una visión complementaria del problema, integrando la caracterización estadística de la textura con su comportamiento dinámico en el proceso de correlación. Este enfoque refuerza la idea de que la evaluación previa de la textura puede incorporarse como etapa sistemática en protocolos de monitorización estructural basados exclusivamente en imagen.

En conjunto, los resultados obtenidos consolidan una base metodológica para el desarrollo de sistemas markerless aplicables a estructuras reales, orientados a soluciones no invasivas, de bajo coste y fácilmente desplegables en condiciones de servicio. El análisis estadístico de texturas se plantea como una herramienta clave para mejorar la robustez y fiabilidad de técnicas de seguimiento del movimiento estructural en escenarios reales.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Xu, Y., and Brownjohn, J. M. W., "Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 8, pp. 91–110, 2018.
- [2] Ferrer, B., et al., "Parametric study of the errors obtained from the measurement of the oscillating movement of a bridge using image processing," *Proceedings of the International Conference on Structural Dynamics*, 2016.
- [3] Sutton, M. A., Orteu, J. J., and Schreier, H., *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*, Springer, New York, 2009.
- [4] Pan, B., Qian, K., Xie, H., and Asundi, A., "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review," *Measurement Science and Technology*, vol. 20, no. 6, 2009.
- [5] Haralick, R. M., Shanmugam, K., and Dinstein, I., "Textural features for image classification," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-3, no. 6, pp. 610–621, 1973.
- [6] Ojala, T., Pietikäinen, M., and Mäenpää, T., "Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, no. 7, pp. 971–987, 2002.
- [7] Jolliffe, I. T., and Cadima, J., "Principal component analysis: a review and recent developments," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 374, no. 2065, 2016.