

2022 振動與噪音工程學會學術研討會中文論文

應用數位影像相關法進行結構位移追蹤分析

Application of digital image correlation method for structure displacement tracking analysis

林佳業¹、蔡承恩¹、李綺芳²、吳昌政²、黃心豪^{1,*}

國立台灣大學工程科學與海洋工程學系¹

財團法人驗船中心²

*Email: hsinhaohuang@ntu.edu.tw

摘要

船舶運輸為現今主要的運輸方式之一，然而在營運期間船體遭受環境影響進而腐蝕以及海浪衝擊力的影響，造成船體材料減損抑或是因應力所造成的船體變形問題。本篇論文將呈現目前實驗室研究團隊自主開發之數位影像相關位移演算法，利用加速規以及有限元素模擬進行方法驗證，量測特徵點在衝擊試驗中的軸向位移量，接著對位移量進行快速傅立葉轉換得到結構之自然頻率，並且利用加速規以及數值模擬進行頻率驗證，誤差皆在 3% 以內。利用數位影像相關法的非接觸式量測特性，可以有效解決傳統儀器測量速度慢以及成本高昂的問題，並且可以有效減少人力資源的浪費。本實驗利用低成本的消費型智慧手機，相較於傳統的相機，具有降低監測成本的效果，並且同時也能夠達到相當的量測精度。

關鍵詞：亞像素位移追蹤演算法、數位影像相關法、模態分析、結構健康監測(SHM)

1. 前言

結構健康監測系統目前主要監測方法著重在於在結構表面佈設大量接觸式感測器，並且需耗費大量資源進行訊號處理以及資料的數據分析。但在一般的海況環境下，高鹽分的環境可能造成感測器的受損，以長期監測情況來說，對於設備維護以及資料取得皆有一定的難度。為了降低這些監測成本，本實驗室開發一種不同於以往的監測模式，利用影像進行非接觸式的結構健康監測，隨著科技日新月異，手機的相機畫質已能夠達到 4K 的像素，也不低於傳統的相機，利用手機相機的低成本優勢，在保有可接受監測準確度的情況下降低金錢以及人力成本，建構新型的結構健康監測系統，企圖在傳統產業以及為來的船舶產業帶來正向幫助。

本方法將可以幫助船東、船員、驗船師取得船體健康系統的即時監測，在極端海況下應用此系統可以即時對於超出合理變形範圍的區域及時提出警訊，讓船上人員可以對船體做出及時處置，達到影像結構健康監測方法的目的。

2. 相關文獻回顧

2017 年 Littell 人於 NASA Langley Research Center，將 DIC 方法應用於全尺寸飛機碰撞試驗之變形測量[1]。DIC 方法可以成功地應用於實驗模態分析 (Experimental modal analysis, EMA) [2] 和操作模態分析 (Operational modal analysis, OMA) [3-6]，這兩種方法可以用來找出頻率和模態振型。在動態測試中，2020 年時 Peyman 等人利用三維數位影像相關法方法量測風機實際葉片的表面變型，利用五組相機達成全長六十公尺的風機葉片全域量測，並且可以利用傅立葉轉換計算出葉片受到敲擊時，葉片的振動頻率[7]。在 2021 年時，Chen 等人對 14.3 m 長的 WTB 進行疲勞測試，試驗過程中將數位影像相關法量測系統設置在葉片一側進行非接觸式損傷檢測，數位影像相關法測量以 58 幀/秒 (FPS) 的速率記錄，此結果可以很好地抓出研究區域的挫曲行為[8]。若未來能夠將 DIC 系統與感測器相結合來進行 EMA，則將提供更快、更有效的結構健康監測解決方案，同時可以藉由模態參數來評估結構損壞，藉此達到結構健康監測的目的。

3. 研究原理以及過程

3.1 數位影像相關法

數位影像相關法是一種在影像方法中量測目標特徵點位移以及變形量的一種技術，利用相機捕捉結構在運動中的連續影像，切割成單一幀幅分析結構運動期間特徵點的影像灰階值變化，可以得到待測物特徵點位置每個時刻下的位移以及變形。

3.2 亞像素位移追蹤演算法

過去的影像追蹤技術大多使用整像素解來進行特徵點的位移追蹤，然而透過線性擬合方法建構出影像平面的相關係數場矩陣後，對係數場矩陣進行空間微分令其等於零可以得到影像的亞像素解，藉此突破過去僅能運算整像素解的限制。

本研究利用正規化交叉相關法 (Normalized Cross Correlation, NCC) 計算幀幅間的相關係數場

$$C_{NCC} = \sum_{i=1}^S \frac{f_i \cdot g_i}{\bar{f} \cdot \bar{g}} \quad (1)$$

$$\bar{f} = \sqrt{\sum_{i=1}^S f_i^2} \quad (2)$$

$$\bar{g} = \sqrt{\sum_{i=1}^S g_i^2} \quad (3)$$

影像幀幅集合總數為 S ， f 為在影像集合中定義的參考影像 (reference image)， g 為在影像中所匯入的檢測幀幅影像 (input image)。

利用式(1)所建構相關係數場可以尋找相關係數極大值，而此相關係數即為影像位移追蹤之整數解，我們以相關係數場極大值為中心，以極大值做為中心取出一 3×3 的子集合做為亞像素搜尋的矩陣，以此空間座標建構出相關係數函數場，本研究採用二元二次方程式擬合出此相關係數場的相關係數場

$$C_{NCC} = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \quad (4)$$

利用擬合結果可以求出 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 係數，接著對式(4)取空間微分令其等於零可以求得在相關係數場中的亞像素極值。

$$\frac{\partial C_{NCC}}{\partial x}(x, y) = a_1 + 2a_4x + a_5y = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_{NCC}}{\partial y}(x, y) = a_1 + 2a_4x + a_5y = 0 \quad (6)$$

由式(5)以及式(6)兩式聯立整理即可得到特徵點之亞像素位移

$$x = \frac{2a_1a_5 - a_2a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5} \quad (7)$$

$$y = \frac{2a_2a_3 - a_1a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5} \quad (8)$$

本研究所使用之亞像素位移追蹤演算法可以快速計算目標特徵點，搭配目前的相機攝影設備，可以精準量測微小的位移量，達到量測結構微小振動的目的。

3.3 比例因子位移轉換法

在3.2中我們說明了如何追蹤影像中的亞像素位移，然而，或是將其實際進行量測應用，我們須將其像素

數據轉換為空間中的實際量側值，因此我們須借助於比例因子(Scale factor)的推導計算得出像素與實際空間單位之間的關係。

二維的數位影像相關法轉換可以參考理想之針孔成像模型 (如圖 1 所示)，目標特徵點在空間中之座標為 (X, Y, Z) ，而在影像的拍攝過程中，將會呈現在影像的感光元件之上，而感光元件之成像位置即可對應我們實際取得的影像像素座標 (u, v) ，而主軸與影像平面的交點座標為 (c_x, c_y) ，影像平面與原點之間的距離為焦距 f ，原點與真實平面間的距離為 Z ，參考圖 1 可以觀察發現空間平面以及影像平面間所有點皆可構成相似三角形關係，因此，可推導空間座標 (X, Y, Z) 以及影像像素座標寫成以下關係

$$\frac{u - c_x}{f} = \frac{X}{Z}, \quad \frac{v - c_y}{f} = \frac{Y}{Z} \quad (9)$$

兩式整理可得，

$$u - c_x = \frac{f}{Z}X, \quad v - c_y = \frac{f}{Z}Y \quad (10)$$

此時式(10)分別對參數 u 、 v 微分可得

$$\frac{Z}{f}du = dX, \quad \frac{Z}{f}dv = dY \quad (11)$$

其中 Z/f 即為我們所求知比例因子參數，利用此比例因子參數，我們可以推得所量測的像素位移在實際空間座標中的移動距離，藉此來表達像素與真實位移量之間的比例關係。

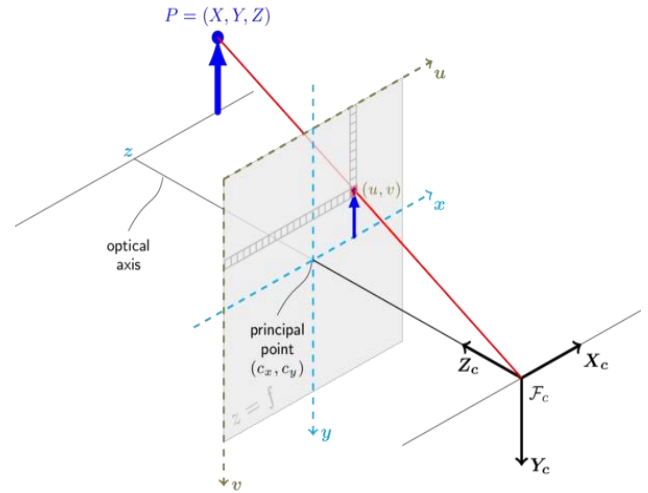


圖 1 影像座標與空間座標理想之座標轉換模型

4. 實驗方法及設計

本研究透過實驗驗證位移演算追蹤法，設計與架設一柔性結構塔架結構，使用壓克力板、L 型鋼銜接支承、與螺栓接合。我們將在結構上建立一特徵點進行亞像素位移演算法進行追蹤，此衝擊試驗設計為藉由敲擊時結構產生側向水平位移，並且由亞像素位移追蹤演算法持續追蹤此目標特徵點，與此同時，我們

將在結構一側架設雷射位移計，量測結構特徵點至雷射變位計的水平位移，藉由兩者數據比對驗證影像位移法的量測精確度。

晃動自然頻率量測。本實驗使用 PCB-352C65 加速規頻率驗證（如圖 4 所示）。



圖 4 頻率驗證所使用之 PCB-352C65 加速規

4.1 實驗影像架設

本研究有別於使用傳統的數位相機，我們使用了低成本的手機相機進行實驗的影像量測，量測相機型號為 Sony Xperia5ii，實際實驗影像如圖 2 所示，本實驗透過追蹤圖 2 中紅框內的特徵點相機之攝影參數如表 1 所示。



圖 2 手機影像之 ROI 實際拍攝影像（紅框內為追蹤的特徵點區域）

表 1 Sony Xperia5ii 之影像攝影參數

拍攝像素	3840 x 2160
拍攝每秒幀幅數	60 fps
攝影焦距	24 mm
拍攝距離	0.257 m

4.2 實驗驗證架設

本實驗透過雷射變位計驗證特徵點在敲擊過程中特徵點的水平軸位移量，所使用之驗證儀器為非接觸式感測器 OPTEX CD33-50NV 雷射變位感測器，量測前需要將儀器與待測物與目標固定約 50 mm 的距離，其量測距離落在 40-60 mm 之間，其擷取卡為 NI-9215 電壓輸入模組，搭配 NI cDAQ-9178 八槽式機箱連結電腦並供應感測器電源，最後以 LABVIEW 程式語言擷取位移訊號，本實驗設定之採樣頻率為 1024Hz。



圖 3 (a) OPTEX CD33-50NV 雷射變位感測器 (b) NI-9215 電壓輸入模組

頻率驗證方法使用加速規進行結構模態自然頻率的量測，利用加速度訊號所量測的頻率訊號進行結構

5. 實驗驗證方法

本實驗將雷射變位計架設於結構側邊，量測結構上特徵點的水平側向位移（實驗架設如圖 5 所示），而對於亞像素追蹤演算法而言，適當的對比度將可以優化位移追蹤演算法的效果，因此，我們利用 QRcode 作為演算法追蹤的特徵區域（Region Of Interest），實驗過程將透過力規敲擊結構，使結構產生側向的自由振動，並且使得雷射變位計以及影像追蹤演算法同時記錄特徵點的水平變位量。

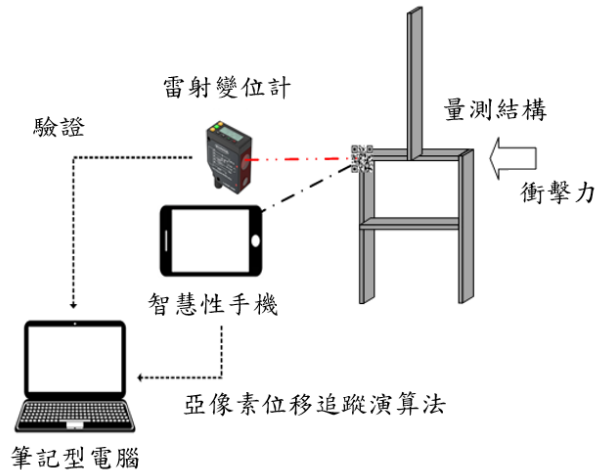


圖 5 演算法驗證實驗實驗架設

6. 實驗結果及討論

6.1 亞像素位移追蹤演算法驗證實驗結果

雷射變位計與影像追蹤演算法兩者之追蹤結果如圖 6 所示，影像之比例因子由計算得為 0.08 mm/pixel，透過經由亞像素位移追蹤演算法可以看到低於整像素解析度的追蹤結果，在圖 6 中，藍色線為影像方法的位移追蹤結果，橘色線為雷射位移計的位移驗證結果，在後段 4s 至 7s 的區間內，可以發現在即使在比例因子的解析度之下仍然仍舊能夠繼續追蹤目標的位移，即驗證亞像素位移追蹤演算法之實際應用能力。

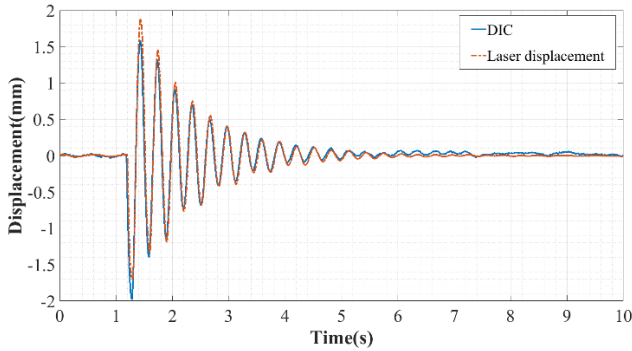


圖 6. 影像位移追蹤方法與雷射位移計比對結果

若是將雷射位移計的結果放大至較小的尺度進行觀察(如圖 7 所示), 可以更清楚發現亞像素演算法所能夠達到的效果。在量測小於整像素解 0.08 mm 的位移量時, 演算法仍舊能夠量測到結構特徵點的位移, 並且頻率與雷射變位計所量測的波具有相同趨勢, 證明亞像素演算法量測結構微小振動時的能力。

本實驗也將力規敲擊的荷重-時間圖與位移-時間圖進行比較(如圖 8 所示), 可以發現在時間上符合敲擊實驗的物理意義, 在力規的荷重出現極值後, 結構的水平位移量呈現逐漸衰弱的趨勢。

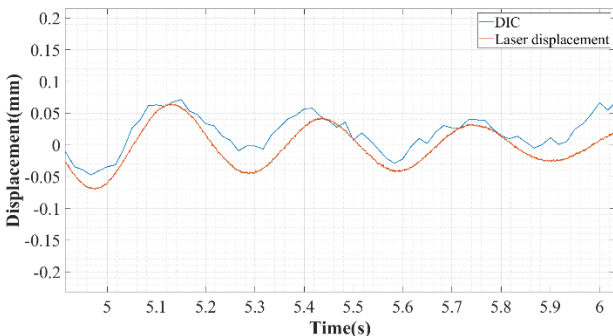


圖 7 亞像素的尺度下演算法的追蹤結果

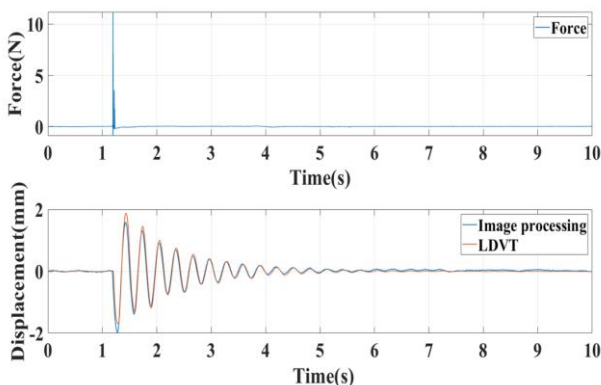


圖 8 力規數據與影像位移數據的時間比對圖

6.2 結構頻譜轉換及驗證

為了計算結構的在低模態的自然頻率, 本研究團隊透過將 6.1 部分的位移量測結果進行快速傅立葉轉換(轉換結果如圖 9 所示), 可以由相對峰值找出結構之

模態頻率並且與加速規之頻率訊號以及數值模擬結果進行比較, 我們將針對第一模態以及第二模態進行並且比較其誤差。

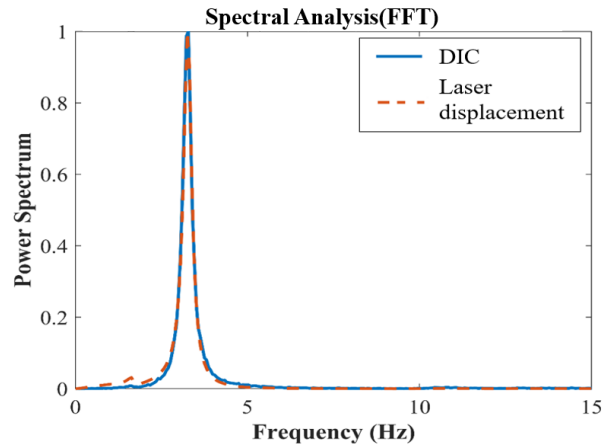


圖 9 影像及雷射變位計位移數據轉換為頻域之結果

驗證方法使用有限元素軟體 Comsol Multiphysics 5.6 進行結構的模態分析, 模擬透過 Comsol 的三維方法進行, 並且使用內建之壓克力模組進行, 此驗證方法專注於較低的前兩個振動模態, 其模擬結果如圖 10 所示, 其結果將取出與加速規以及影像方法的结果進行比對以及討論, 比對結果如表 2 所示。

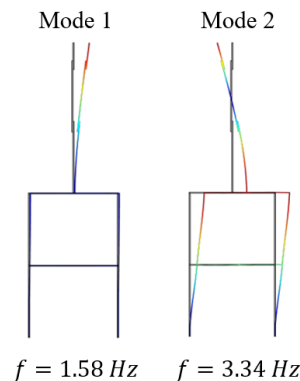


圖 10 Comsol 結構進行數值模擬之結果

表 2 影像頻譜數據與數值模擬結果比較

	加速規	數值模擬	影像方法
第一模態頻率	1.6250 Hz	1.5816 Hz	1.5820 Hz
誤差	-	2.67 %	2.72 %
第二模態頻率	3.2500 Hz	3.3451 Hz	3.2813 Hz
誤差	-	2.93 %	0.96 %

6.3 實驗結果討論

此實驗結果中可以驗證亞像素數位影像相關法進

行特徵點追蹤的能力，過去的位移量測經常受限於整像素解的量測限制，對於結構的微小位移無法精確量測，然後透過亞像素演算法，我們可以突破過去的量測限制，進入到更高精度的量測，除此之外，亞像素演算法也能夠量測到結構表面的微小振動訊號以及位移變形，對於一般大型結構的而言，損傷大都皆為微小變形，甚至可以檢測出在結構表面上的振動訊號，藉此達到藉由影像方法達到結構健康監測的目的。

除了位移的量測訊號外，演算法也能夠分析出結構的振動頻率，利用加速規進行頻率的量測，同時與數值模擬以及影像結果進行比較，由影像方法比對加速規量測所的第一模態以及第二模態的頻率誤差皆在3%以內，顯示出影像方法追蹤結構低頻振動的能力。

7. 結論與外來展望

透過視覺方法進行結構健康監測方法的研究國內外正蓬勃發展中，本研究團隊目前正在發展評估數位影像相關法的量測精度上。本研究驗證視覺方法對於結構健康監測方法的可行性，除此之外，也證實了智慧型手機應用於結構健康監測上的潛力，對於大型結構之結構健康監測主要專注在於低頻模態的量測，現今的智慧型手機大多都可以在高解析度的條件下達到60 fps的量測，然而，若是需要對於一些需要進行高頻檢測的設備，例如：齒輪箱、馬達...等，則需使用高速攝影機進行量測，Kedar等人利用1080 fps的高速攝影機進行風機葉片的振動頻率量測，可以量測到結構的第五模態之振型以及頻率[9]，結構的損傷通常可以從振動的頻率來判斷是否處於健康狀態，因此，可以顯示出影像方法對於結構健康監測的龐大潛力與發展。

總而言之，目前基於影像視覺的方法具有取代傳統結構SHM感測器的潛力，有別於傳統的接觸是感測器具有高成本以及高人力需求的缺點，影像方法相對低的價格以及高度的使用彈性，另外影像方法也可以以非接觸以及遠距離的方法進行結構量測，未來對於一些遠距離或是不適合安裝感測器的環境具有很大的應用空間，例如：船舶部分結構，大型橋梁，高層建築，風力發電機葉片...等等。

8. 致謝

本研究承蒙財團法人驗船中心專案計畫經費支援，得以順利完成，特此感謝。

9. 參考文獻

期刊論文：

- [1] P. Poozesh, J. Baqersad, C. Niezrecki, P. Avitabile, E. Harvey, and R. Yarala, "Large-area photogrammetry based testing of wind turbine blades," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 86, pp. 98-115, 2017.
- [2] S. Barone, P. Neri, A. Paoli, and A. V. Razionale, "Low-frame-rate single camera system for 3D full-field high-frequency vibration measurements," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 123, pp. 143-152, 2019.

- [3] V. Srivastava and J. Baqersad, "An optical-based technique to obtain operating deflection shapes of structures with complex geometries," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 128, pp. 69-81, 2019.
- [4] D. Gorjup, J. Slavič, and M. Boltežar, "Frequency domain triangulation for full-field 3D operating-deflection-shape identification," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 133, p. 106287, 2019.
- [5] Y.-H. Chang, W. Wang, J.-Y. Chang, and J. E. Mottershead, "Compressed sensing for OMA using full-field vibration images," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 129, pp. 394-406, 2019.
- [6] A. Ellenberg, L. Branco, A. Krick, I. Bartoli, and A. Kontsos, "Use of unmanned aerial vehicle for quantitative infrastructure evaluation," *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 21, no. 3, p. 04014054, 2015.
- [7] P. Poozesh, A. Sabato, A. Sarrafí, C. Niezrecki, P. Avitabile, and R. Yarala, "Multicamera measurement system to evaluate the dynamic response of utility-scale wind turbine blades," *Wind Energy*, vol. 23, no. 7, pp. 1619-1639, 2020.
- [8] X. Chen et al., "Fatigue testing of a 14.3 m composite blade embedded with artificial defects—damage growth and structural health monitoring," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 140, p. 106189, 2021.
- [9] M. Mehdikhani, M. Aravand, B. Sabuncuoglu, M. G. Callens, S. V. Lomov, and L. Gorbatikh, "Full-field strain measurements at the micro-scale in fiber-reinforced composites using digital image correlation," *Composite Structures*, vol. 140, pp. 192-201, 2016.

Application of digital image correlation method for structure displacement tracking analysis

Chia – Yeh Lin¹, Chen – En Tsai¹, Chi – Fang Lee², ChangCheng wu², Hsin – Haou Huang¹

¹Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

²CR Classification Society

ABSTRACT

Ship transportation is one of the main type of transportation today. However, the extreme weather of ocean climate is likely to cause the hull to be corroded and affected by the impact of waves, not only will resulting in dents on the surface structure, but leading to the situation of ship arching and sagging. This paper will present the digital image correlation displacement algorithm developed by the laboratory research team, also use the accelerometer and finite element simulation to verify the algorithm. The experiment verifies the method by the impact experiment of the ROI axial displacemen, using digital image correlation method to obtain the displacement data. The non-contact measurement characteristics can effectively solve the problem of low measuring speed and high cost which commonly appear on traditional measurement devices, with the help of image system, we can cost down the waste of the human resource. This paper use low-cost phone camera, compare to the traditional camera, it can lower the cost of the inspection, also, be able to reach the necessary accuracy of the inspection.

Keywords: Subpixel displacement tracking algorithm、Digital image correlation、Modal analysis、Structure Health Monitoring