

# 數位影像相關法和雷射散斑技術於纖維複合材料結構健康監測的 應用探討

吳仁傑\* 鄭昭玄 黃心豪\*<sup>1</sup>

\* 國立台灣大學 工程科學及海洋工程學系

關鍵詞: 雷射散斑、數位影像相關法、纖維複合材料、損傷檢測

## 摘要

本研究主要探討結合數位影像相關法和雷射散斑技術的非接觸式方法，應用於複合材料結構健康監測。現代社會開始強調節約材料，該如何準確找出損傷部位以供後續維修處理成為學界和產業界須共同解決的目標。結構健康監測領域分為接觸式和非接觸式方法，目前接觸式方法已廣泛應用，而非接觸式方法用在複合材料損傷定位方面上仍在不斷發展的路上。本研究利用數位影像相關法結合雷射散斑技術，在無需影響複合材料結構本身的情況下，即可追蹤結構變形並評估損傷位置，進而對複合材料結構健康監測提供有益的解決方案。

---

<sup>1</sup> 聯絡作者 黃心豪 (hsinhaouhuang@ntu.edu.tw)

## 前言

近年來，複合材料被廣泛地運用到各種領域，由於複合材料獨有的耐衝擊、抗腐蝕等特性，材料本身不易產生損傷，但若是受損，不僅外部表面不易觀察損傷情形，內部受損情形將影響材料性能以及操作人員的安全。因此，如何使用快速且安全的檢測損傷方法是本研究的目的。

在數位影像相關法中，絕大部分的研究團隊皆採用人造散斑形式，藉由在結構上噴上白漆、黑漆形式，作為特徵點以供演算法進行分析，此種方法雖較為精準，但在實際使用上卻有些不便，一為破壞結構本身美觀，二為在變形較大的情況下，人造散斑可能脫落，這將造成分析上一大難點，相比於雷射散斑，雷射散斑僅需要試樣表面具備一定的粗糙度，即可使用雷射激發於此表面上，透過拍攝設備捕捉其散射光線，並使用數位影像相關法分析計算，即可找出結構本身的位移應變場，並且可進一步推估實際損傷位置位於何處。

本研究提出了將數位影像相關法與雷射散斑攝影法[1]相結合，用於檢測複合材料的內部損傷。並開發了曝光評估算法和損傷定位算法作為輔助工具。曝光評估算法可用於快速調整相機參數，以獲得更好的散斑質量；損傷定位算法可通過程序快速找到受損位置。實驗表明，該非接觸式損傷檢測系統可以有效地定位複合材料中的內部損傷。此外，應變準確度的誤差也可以控制在10%以內。隨後也通過實驗比較了可能影響應變準確度的各種因素，包括相機距離測試物的距離等。結果表明，在近距離拍攝可以達到更好的應變準確度。

## 2. 曝光評估演算法

本節將介紹本研究室開發的曝光評估算法。其目的是使用戶能夠以最小的時間成本達到最佳的散斑圖像質量，以便可以找出良好的特徵點跟蹤分析。此外，它有助於避免感興趣區域(ROI)對圖像評估的影響。該算法可以讀取任何散斑圖像，並在分析後提供有關對比度是否不足以及曝光是否過高、過低或適中的信息。以下將詳細介紹該算法及其邏輯。

首先，將一幅散斑圖像讀入程序並選擇要分析的感興趣範圍。這個範圍的大小不會影響後續的分析，因為觀察到的灰度信息將被正規化，因此整體數據將落在0和1之間。其次，計算灰度值的平均值和標準差。平均灰度值的公式如式(1)所示，灰度值的平均標準差如式(2)所示。

$$\bar{k} = \sum_{k=0}^{L-1} \frac{P_k \times k}{w \times h} \quad (5)$$

$$MSDG = \sqrt{\sum_{k=0}^{L-1} \frac{\{(k-\bar{k})^2 \times P_k\}}{w \times h}} \quad (6)$$

## 研究方法

### 1. 雷射散斑攝影

首先介紹本研究會用到方法及原理。我們將雷射投射在物體粗糙表面上，當雷射光束從材料的粗糙表面散射並落在另一個表面上時，它會形成一個雷射散斑圖形，再通過攝影設備如數位相機等成像設備，可以捕捉到具有明亮和暗斑點的雷射散斑模式[2]，如圖1所示。在分析過程中，我們會選擇一幅無失真的圖像，我們稱為參考圖像。這個參考圖像會包含一個帶有明亮和暗斑點的雷射散斑模式。通過使用數位影像相關方法將其與變形目標圖像上的雷射散斑模式進行比較，可以獲得目標材料的位移和應變場信息。

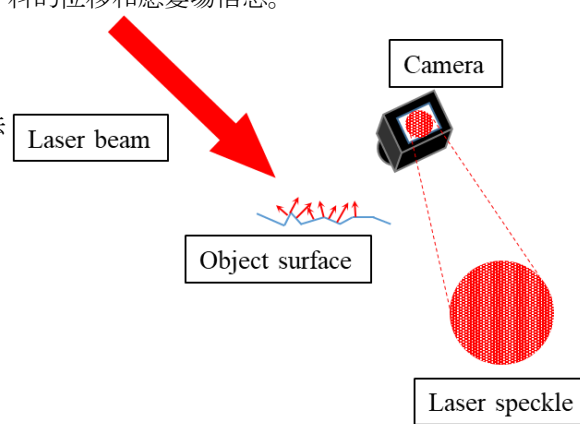


圖 1 雷射散斑圖案形成示意圖

在這裡，L是灰度值的總數，最多有256種，即從0到255，k是灰度值， $P_k$ 是灰度值的數量，w是感興趣區域的寬度，h是感興趣區域的高度。

接著，在獲得上述兩個數值後，便可以開始分析灰度值的分佈。在這個算法中，初始步驟是分析圖像的對比度是否足夠高。較高的對比度導致灰度值分佈更均勻，從而使得散斑質量更好。相反，較低的對比度則表明散斑質量較差。該算法使用平均值加減一個標準差作為界限。從這個界限中，它識別出最大和最小計數，並使用麥克森對比度[3]的概念提出對比度指標。對比度指標的公式由式(3)給出。

$$CI = \frac{P_{k_{max}} - P_{k_{min}}}{P_{k_{max}} + P_{k_{min}}} \quad (7)$$

對比度指標(CI)用於定義灰度值分佈的一個表示式，其計算結果介於0和1之間。較低的指標表示較高的對比度，其灰度值均勻分布；反之較高的指標則表示較低的對比度，灰度值有較大的落差。具體上我們會說，如果 $P_{k_{max}}$ 大於2倍的 $P_{k_{min}}$ ，則代表此圖像是低對比度。

最後，我們會評估曝光量是否過多或過少。如果曝光過多，系統將通知曝光過高，應該降低曝光，反之亦然。我們會將灰度值區分成3部分，會這樣分是因為使用了18%中性灰的概念，其中圖像中間的灰度值，對應

於中性灰，通常為灰度值為127，被用作測光參考。將此概念應用於曝光分析時，從106到151的範圍被視為參考範圍。評估包括確定在0到105、106到151和152到255範圍內的灰度值比例。如果152到255的比例大於0到105的兩倍，則表示曝光過度。相反，如果0到105的比例大於152到255的兩倍，則表示曝光不足。此處不考慮106到151範圍內的像素計數；如果過多，則在第三步中將顯示低對比度。

### 3. 數位影像相關法(DIC)

本研究所使用的DIC軟體是NCORR[4]，不過在檢測小區域的損傷時，需要更精準的方法去分析像素位移。因此本研究會在數位影像相關框架中採用了相位相關方法(PCM)，並與逆組成高斯-牛頓(IC-GN)方法相結合。PCM用於計算整數像素位移解，作為初始位移估計。隨後，應用IC-GN方法對這些估計進行精煉，以達到次像素位移準確度。

PCM的理論[5]參考如下，首先會由一個位移函數表示(4)：

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (4)$$

其中 $f_1(x, y)$ 是初始影像函數， $f_2(x, y)$ 為經過平移的影像函數，而 $(x_0, y_0)$ 則代表位移值。接著可以透過傅立葉轉換：

$$\hat{f}_2(u, v) = \hat{f}_1(u, v) \exp(-i(ux_0 + vy_0)) \quad (5)$$

接著經過標準化的交叉功率譜和替換式(5)，可以得到：

$$C_{PCM}(u, v) = \frac{\hat{f}_2(u, v) \hat{f}_1^*(u, v)}{|\hat{f}_2(u, v) \hat{f}_1^*(u, v)|} = \exp(-i(ux_0 + v)) \quad (6)$$

最後，將式(6)從頻率域轉換回空間域，得到：

$$c_{PCM}(x, y) = \delta(x - x_0, y - y_0) \quad (7)$$

其中， $x_0, y_0$ 是整數像素位移解，也是之後將替換到IC-GN中的初始位移猜測值。

接下來是IC-GN[6]的介紹，其實際的流程圖如圖2[7]所示：

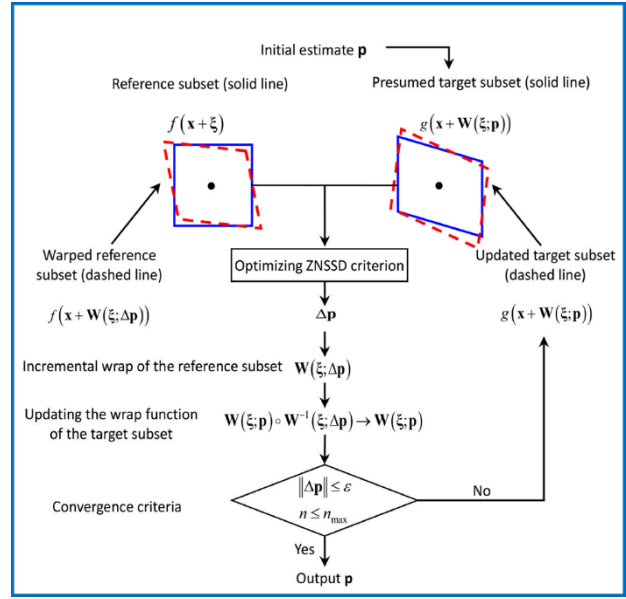


圖 2 ICGN法的流程圖

相較於一般演算法得出的相關係數是加在當前影像，藉由慢慢修正相關係數可以使後續影像逼近最接近實際的變形場。逆合成高斯牛頓算法則是相反，將相關係數修正在參考影像，這樣的好處可以使得每次都不需要更新矩陣，因為參考圖像的座標不會變動，然後將修正的參考影像藉由反矩陣與當前影像比對，藉由相關係數的迭代可以越來越逼近實際的變形情況。

首先一開始先給予預測模型(或實際測的圖)迭代的初始化值，也就是上方PCM法得出的 $x_0, y_0$ ，之後與參考圖形對比後帶入演算法。得出相關係數後，將他加在參考圖像的函數裡計算，好處是使用每次迭代時從，這意味著每次迭代的hessian都是相同的，因此只需要計算一次。接著利用反矩陣的形式將結果用在現有圖形看是相同變形，若沒有則繼續迭代，直到結果有到收斂範圍內。

## 實驗方法

### 1. 曝光評估演算法實驗

首先進行該實驗，實驗目的是想了解我們提出的演算法是否可以調整測量的精度。該實驗將調整一幅影像，並根據該影像的拍攝參數記錄測試件的變形，在這裡我們使用了拉伸試驗。最後，計算的實驗應變與應變規的應變進行比較，觀察調整後的結果。此實驗的實驗設置如圖3所示：

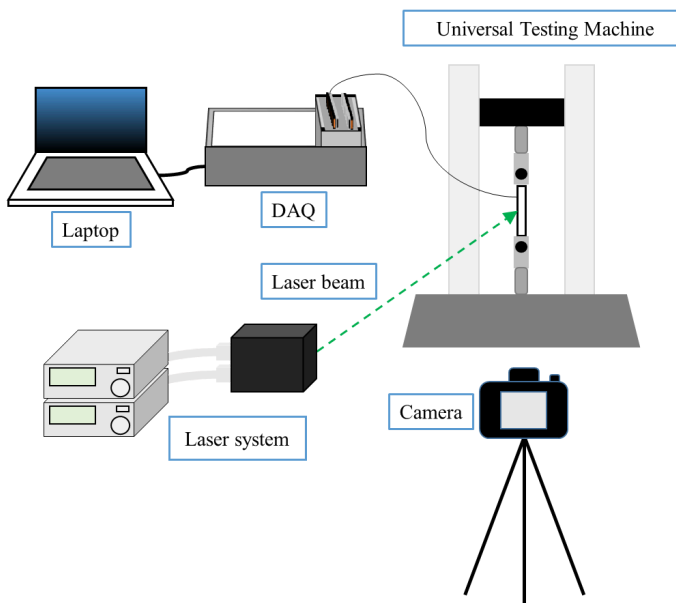


圖 SEQ 圖 \\* ARABIC 3 實驗設置示意圖

實驗使用金屬材料，具體是鋁試樣，作為測試樣品。拉伸試驗以0.6 mm/min 的速率進行，相機以每分鐘20張的速率捕獲影像。

在第一組實驗中，將影像加載到算法中後，所計算出的結果如圖4所示，表明由於對比度低和曝光過高，需要進行調整，所得出的實驗應變精度如圖5所示，計算誤差為207%。

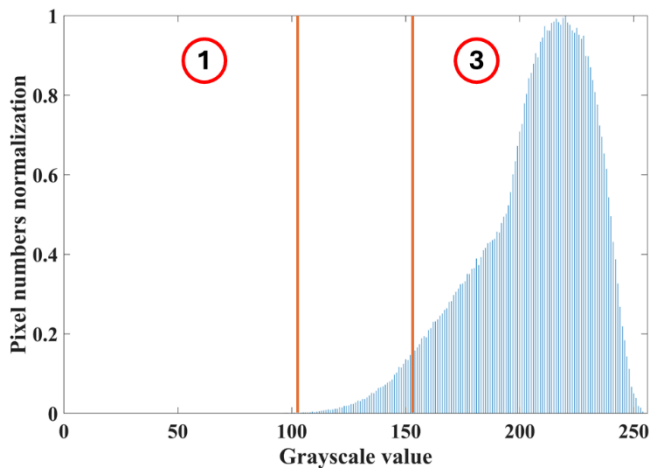


圖 SEQ 圖 \\* ARABIC 4 第一組數據得出的灰度值分布圖

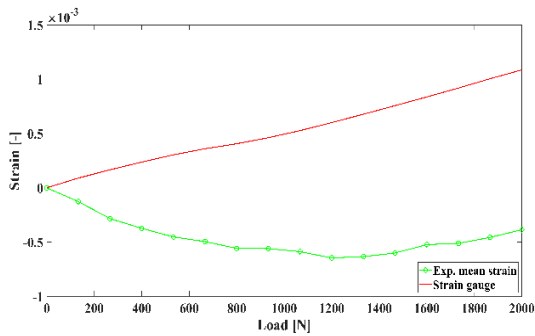


圖 5 第一組數據得出的應變差異圖

對於第二組實驗，將影像通過算法運行後，產生的結果如圖6所示，表明由於曝光過高，需要降低曝光值。該影像的實驗應變精度如圖7所示，計算誤差為16%。

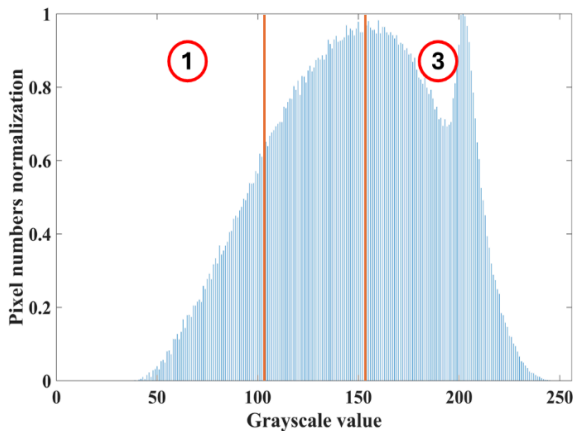


圖 6 第二組數據得出的灰度值分布圖

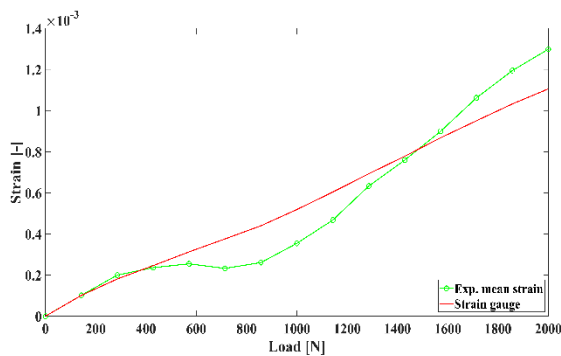


圖 7 第二組數據得出的應變差異圖

在第三組實驗中，經過算法處理的影像的結果如圖8所示，表明曝光適當。該影像的實驗應變精度如圖9所示，計算誤差為9%。這三組實驗說明本研究開發的曝光評估算法與實驗結果相一致。當曝光適當時，觀察到較低的實驗誤差，而曝光不足時則會出現較高的誤差。

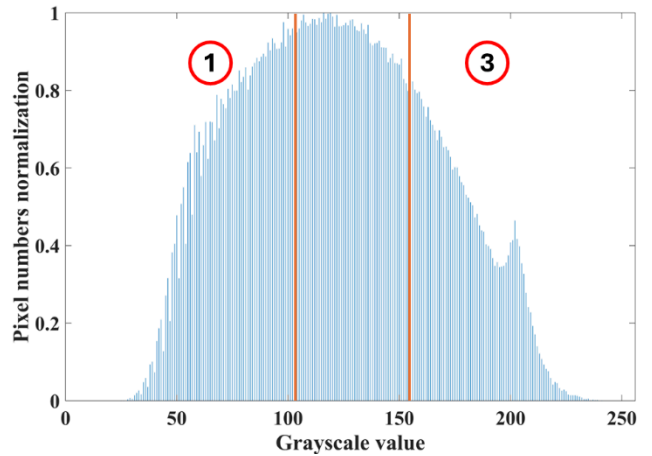


圖 8 第三組數據得出的灰度值分布圖

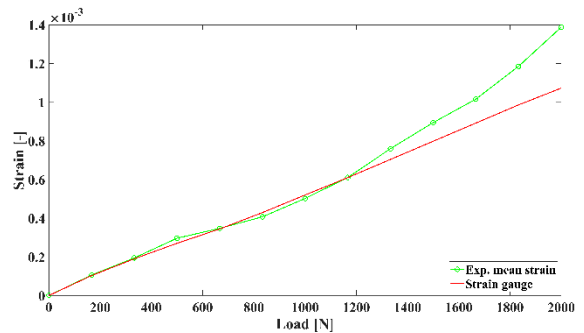


圖 9 第三組數據得出的應變差異圖

## 2. 精準度實驗

由前面曝光評估演算法實驗得出好的曝光值及對比度後，繼續以鋁試片嘗試，同樣以雷射散斑測出的應變與應變規進行比對，所得出的應變誤差資訊如圖10所示，可以看出其應變誤差落在10%以內，不過一開始的較大誤差推測是剛開始拉伸時，變形量還不夠充足，以至於追蹤的誤差較大。

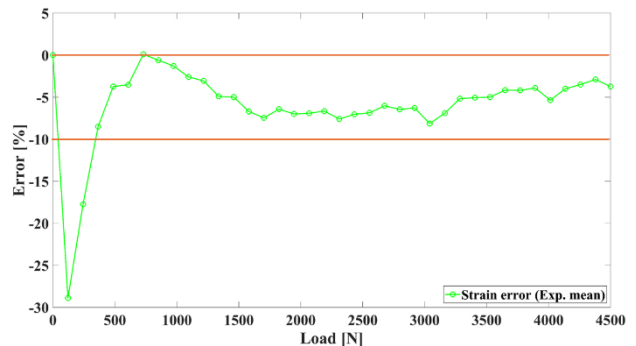


圖 10 雷射散斑測出的應變與應變規之誤差分析圖

### 3. 比例因子實驗

我們藉由這個實驗想了解相機在何種距離範圍內可以獲得較好的應變精度，我們設定比例因子公式是  $\text{mm}/\text{pixel}$ ， $\text{mm}$ 表示待測物的寬度，這邊這個值是固定的，而 $\text{pixel}$ 則會因相機距離遠近而改變，當相機距離物體越近則會有較大的 $\text{pixel}$ ，反之亦然，因此可以用下圖11來清楚說明：

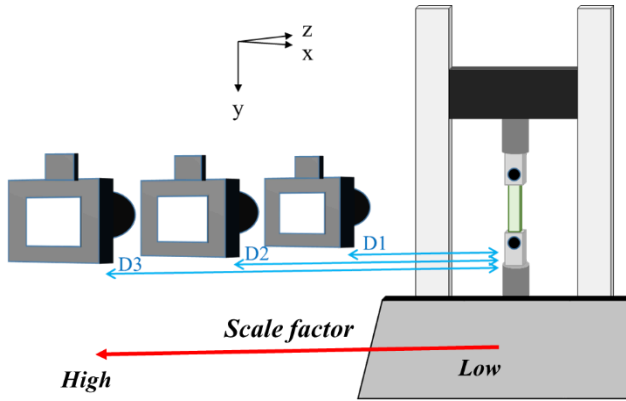


圖 11 本實驗比例因子示意圖

接著將實驗結果表示在圖12，我們使用5組不同的比例因子進行實驗，從0.028開始為本相機最小的對焦距離，一路拉遠拍攝，從圖可以觀察出來誤差值會隨著比例因子變大而升高。從實驗也可以看出雷射散斑在距離的要求相當高，且使用最近距離拍攝有較好的結果。

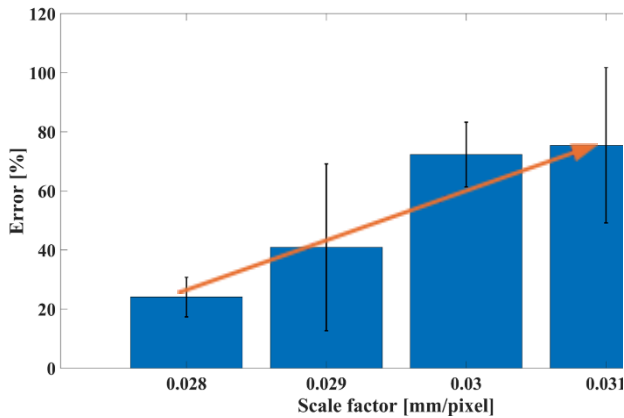


圖 12 比例因子的實驗結果

### 4. 內部損傷實驗

我們將在此實驗中製作一個玻璃試片複合材料並產生一個內部損傷，我們的玻璃試片堆疊排序為  $[0/90]_{2S}$ ，並在其第二、三層在中間處剪斷，藉此製造出纖維斷裂損傷試片，示意圖如圖13所示：

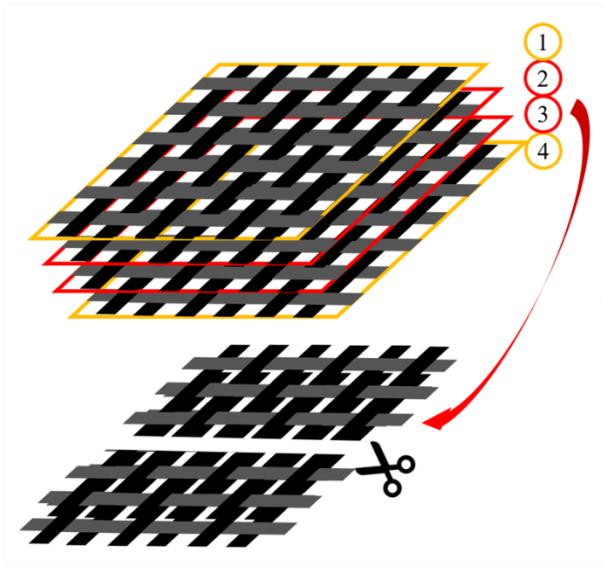


圖 13 複合材料損傷示意圖

我們使用先前提到的方法丟入DIC軟體做計算，其結果可以看到圖14，可以發現藍色框框的損傷區域有明顯的應變集中現象：

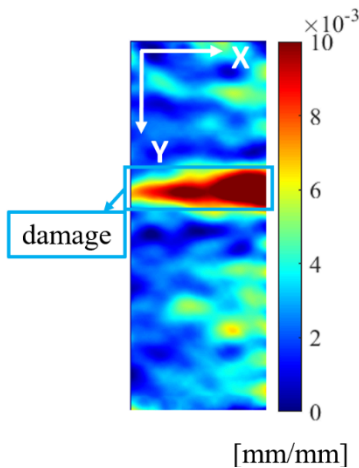


圖 SEQ 圖 \ ARABIC 14  
DIC分析出的損傷區域

為了更加直觀的分析損傷區域，本研究也開發有關損傷定位的演算法，在應變資訊上利用平均值加上兩倍標準差來評斷，若是應變值大於此則設為1，反之則設為0，實際輸出結果圖如圖15所示，可以看到白色區域為損傷區域。

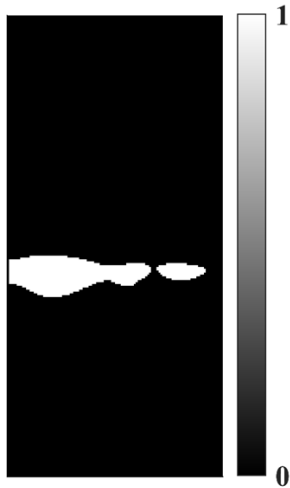


圖 15 開發出的損傷定位演算法結果圖

## 結論

首先本研究研發的雷射散斑非接觸式健康檢測系統，搭配研發的曝光評估演算法，藉此評估影像的對比度以及曝光量是否充足，若是不足則可以調整相機參數來修正拍攝的影像品質。再來我們將調整適當的影像計算出的應變誤差低於10%，在後續的應變經度應用上可以有效進行追蹤。

本研究也在相機距離物體的距離進行研究，可以發現在拍攝距離上須盡可能靠近待測物。

最後也成功地檢測出材料內部的損傷區域，不需以人工判斷即可進行精準的損傷定位，大大減少損傷檢測的時間。

## 致謝

本研究為國科會計畫(NSTC 111-2221-E-002-108)研究成果，由於國科會的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 參考資料

- [1] A. Fercher and J. D. Briers, "Flow visualization by means of single-exposure speckle photography," *Optics communications*, vol. 37, no. 5, pp. 326-330, 1981.
- [2] J. D. Briers and S. Webster, "Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non-scanning, full-field technique for monitoring capillary blood flow," *Journal of biomedical optics*, vol. 1, no. 2, pp. 174-179, 1996.
- [3] E. Peli, "Contrast in complex images," *JOSA A*, vol. 7, no. 10, pp. 2032-2040, 1990.
- [4] J. Blaber, B. Adair, and A. Antoniou, "Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software," *Experimental Mechanics*, vol. 55, no. 6, pp. 1105-1122, 2015.
- [5] H. Foroosh, J. B. Zerubia, and M. Berthod, "Extension of phase correlation to subpixel registration," *IEEE transactions on image processing*, vol. 11, no. 3, pp. 188-200, 2002.
- [6] B. Pan, K. Li, and W. Tong, "Fast, robust and accurate digital image correlation calculation without redundant computations," *Experimental Mechanics*, vol. 53, pp. 1277-1289, 2013.
- [7] B. Pan, "Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals," *Measurement Science and Technology*, vol. 29, no. 8, p. 082001, 2018.

# EXPLORATION OF THE APPLICATION OF DIGITAL IMAGE CORRELATION AND LASER SPECKLE TECHNIQUES IN STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF FIBER COMPOSITE MATERIALS

*Jen-Chieh Wu, Hsin-Haou Huang\**

\* Department of Engineering Science and Ocean Engineering National Taiwan University

*Keywords: Laser speckle, Digital image correlation(DIC), Fiber-reinforced composites, Damage detection*

## ABSTRACT

This study primarily investigates a non-contact approach that combines digital image correlation methods with laser speckle techniques for monitoring the structural health of composite materials. With the emphasis on material conservation in modern society, accurately identifying damaged areas for subsequent repair becomes a goal shared by academia and industry. The field of structural health monitoring is divided into contact and non-contact methods, with contact methods widely employed currently. However, non-contact methods for locating damage in composite materials are still under development. This study utilizes digital image correlation methods combined with laser speckle techniques to track structural deformation and assess damage locations without affecting the integrity of the composite material structure. This provides a beneficial solution for monitoring the structural health of composite materials.