

# 應用視覺感測器監測船體變形以及裂縫破壞

林佳業\* 李綺芳\*\* 吳昌政\*\* 黃心豪\*<sup>1</sup>

\*國立台灣大學 工程科學與海洋工程學系暨研究所  
\*\*財團法人驗船中心 研究處研發組  
E-mail: hsinhaohuang@ntu.edu.tw

關鍵詞：結構健康監測、數位影像相關法、影像監測演算法、破壞分析

## 摘要

船舶在不同的海況條件下，會產生不同的結構變形，包括舢舨及舢垂，且波浪為長期負荷，對於船體結構可能會造成疲勞裂縫。本研究針對船體結構進行非接觸式影像監測，找出航行期間，船體結構可能會發生的結構失效模式及破壞位置。現今傳統船體監測方法大多使用應變規，而應變規的分析需要耗費巨大的佈設成本及龐大的人力進行資料採集。本研究採用影像方法進行非接觸式的方式量測，其具有彈性的使用空間，可隨時針對當下海況可能發生的破壞位置進行監控，進而更有效的利用資源。本研究開發的影像追蹤方法可以對船體結構特徵點進行分析，利用特徵點的像素位移換算比例因子得到結構的凹痕變形，除此之外，透過分析結構表面的全域應變場，可使用應變場找出結構表面應力集中處，便可預測裂縫以及破壞可能發生的位置。本研究藉由數位影像相關方法發展影像結構監測的方法，透過像素間的線性關係，可以達到亞像素的追蹤精度，因此可以打破傳統以往影像最高只能夠達到整像素解精度的限制。除此之外，透過建立表面全域的位移場，可以利用全域位移場進行拉格朗日轉換計算出表面的全域應變場，利用全域應變場則可達到在材料表面發生破壞前有效進行預測破壞的目的。

## 前言

在現今的結構健康監測系統中，主要的監測方法著重在於在結構表面佈設大量的接觸式感測器，並且需要耗費人員大量的時間以及成本來進行訊號的採集以及分析，且若是對於船舶須要長期監測的環境而言，也需要考慮到設備維護以及在出航期間資料取得的不易。本篇論文將呈現目前實驗室所開發之船體視覺影像監測方法，可對船體進行非接觸檢測，利用數位影像相關法對船體進行位移變形以及結構表面應變量的量測。在變形位移追蹤演算法的部分，我們的演算法可以追蹤亞像素的精度，並且在實驗中與雷射測距儀進行比對，兩者間具有高度擬合的結果，除此之外，在結構應變量的量測精度上，所使用之演算法也能夠達到 $1.2 \times 10^{-4}$ 的應變量量測精度，並且在實驗中使用了應變規對影像量測的應變量進行驗證。除了與應變規的比對實驗外，本研究也利用數值模擬的方法找出船體結構在不同的波況下所可能的應力集中位置，並且將其擷取出建立局部結構縮尺模型，以拉伸試驗對結構進行測試，在實驗過程中同時以數位影像相關法進行監測，成功預測出結構破壞發生的位置。

## 1. 研究方法

本研究所使用之演算法以數位影像相關法作為主軸進行延伸[1]，分別以頻譜轉換法[2]以及反向合成高斯牛頓法[3]進行結構表面位移場的建立，位移場可對於結構變形進行判斷，而應變場則利用所建立之位移場進行應變場的轉換[4]，以結構表面的全域應變場進行裂縫破壞的預測，因在裂縫發生前通常會先發生應變集中的現象，因此可提早預測所發生破壞的位置[5, 6]。

### 1.1 頻譜轉換位移分析

在位移頻譜計算中我們計算影算在不同幀幅間的像素位移長度，其中，影像中每個像素點的位移可以用下列的數學式表示：

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (1)$$

$f(x, y)$ 為像素在影像中所對應位置， $x_0$ 以及 $y_0$ 為影像中心在第二幀幅相對於第一幀幅所移動的像素長。

自式(1)中對兩影像進行傅立葉頻域轉換(Fourier shift)，可得下式：

$$\hat{f}_2(u, v) = \hat{f}_1(u, v) \exp(-i(ux_0 + vy_0)) \quad (2)$$

最後，我們將式(2)進行標準化，可以由峰值計算出第一幀幅相對於第二幀幅的像素位移量。

$$\frac{\hat{f}_2(u, v) \hat{f}_1(u, v)^*}{[\hat{f}_2(u, v) \hat{f}_1(u, v)^*]} = \exp(-i(ux_0 + vy_0)) \quad (3)$$

## 1.2 反向合成高斯牛頓法

在材料受力變形的過程中，不論是拉伸或是剪切變形，影像子集 (Image Subset) 將會由原先的形狀受到影像???, 為了要估算子集的形變量，因此需要引入反向合成高斯牛頓法 (Inverse compositional Gauss-Newton method, IC-GN method) 進行形函數的估算，其流程如下，首先我們會先利用圖像的像素亮度計算每個像素的x方向以及y方向的梯度值，計算 Hessian 運算矩陣：

$$H = \sum_{i=1}^I \left( \nabla f_i \frac{\partial W_i}{\partial P} \right) \left( \nabla f_i \frac{\partial W_i}{\partial P} \right)^T \quad (4)$$

在式(4)中，我們可以計算得到影像的剪切函數  $\Delta P$ ，將剪切函數套至幀幅 2，使用 ZNSSD criterion 計算兩個子集間的吻合程度，若  $C_{ZNSSD}$  值大於於 0.0001 則持續迭代計算  $\Delta P$ ，在我們的程式中設定兩個結束迭代的條件，一為  $C_{ZNSSD}$  值小於 0.0001，二為迭代次數超過 100 次。由最後推導出之  $\Delta P$  如下：

$$\Delta P = -H^{-1} \sum_{i=1}^I \left( \nabla f_i \frac{\partial W_i}{\partial P} \right)^T \left[ f_i - \bar{f} - \frac{\bar{f}}{\bar{g}} (G(x^0 + W(\Delta x_i, P) - \bar{g})) \right] \quad (5)$$

於演算法的最後，我們可以藉由  $C_{ZNCC}$  準則計算得到兩子集間的相關性。

$$C_{ZNSSD} = \sum_{i=1}^I \frac{(f_i - \bar{f})(g_i - \bar{g})}{\bar{f}\bar{g}} \quad (6)$$

## 1.3 數位影像相關法全域應變分析

在上述的 1.1 以及 1.2 的內容中，我們可以得到試片表面的全域位移場，利用此位移場我們可以進行單點應變的推算，首先我們會將位移場進行切割擷取出一部分進行應變場的計算，擷取方法如圖 1 所示。

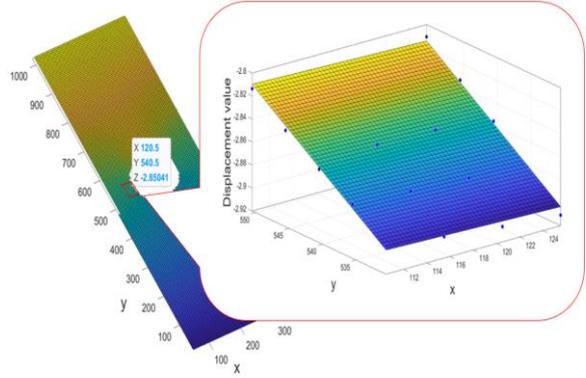


圖 1、自位移場中擷取區塊進行應變場的推算

我們首先可利用方程式建立後續欲擬合的位移場平面函數：

$$\begin{aligned} u(i, j) &= a_0 + a_1x + a_2y \\ v(i, j) &= b_0 + b_1x + b_2y \end{aligned} \quad (7)$$

並且將位移場子集內的所有點代入並且進行最小平方擬合係數。

$$X^2(a_0, a_1, a_2) = \sum_{x, y, z \in W_s} [u(x, y, z) - (a_0 + a_1x + a_2y)]^2 \quad (8)$$

$$Y^2(b_0, b_1, b_2) = \sum_{x, y, z \in W_s} [v(x, y, z) - (b_0 + b_1x + b_2y)]^2$$

最後，對平面斜率進行微分得到全域之拉格朗日應變：

$$\begin{aligned} E_{11} &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] \\ E_{22} &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E_{12} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

上述所推導之拉格朗日應變方法可以應用於所有幅度之應變。

## 2. 實驗方法及設計

本研究分別設計實驗驗證了演算法在量測位移量以及應變量量測的數值，位移演算法進行衝擊實驗以影像方法量測結構的位移並且以雷射測距儀進行驗證，應變方法使用拉伸實驗進行驗證，同時以影像進行量測並且與應變規的數值進行驗證，同時，我們也透過數值方法取出船體上的兩個易受應力集中的點位進行局部結構的預測破壞實驗。

### 2.1 特徵點位移追蹤分析

我們透過衝擊實驗驗證位移量測的數值，其中，我們將影像方法的追蹤區域定位在摔落鐵塊上的特徵點上，並且以雷射位移計量測摔落距離，並且與雷射位移計的量測距離進行比對，實驗架設如圖 2 所示。

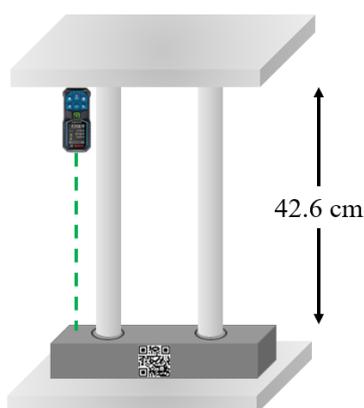


圖 2、位移演算法驗證實驗架設

### 2.2 影像應變場應變精度驗證實驗

本研究利用拉伸試驗對影像的應變量測精度進行驗證，使用相機 Nikon D600 進行拍攝，拍攝規格如表 1 所示。

表 1、Nikon D600 拍攝規格

影像解析度	1920 x 1080
焦距	85 mm
幀幅	30 fps

在實驗過程鋁材將透過 Instron 材料試驗機進行拉伸，將試片拉伸至鋁材試片降伏前，並且藉由比對應變規量測值與影像所量測的數值進行比對。在實驗過程中，應變規的採樣頻率為 1024 Hz，所使用的擷取卡為 NIDAQ-9178c 電壓輸入模組，搭配

NIDAQ-9178 八槽式機箱連接電腦並供應可測器電源，最後由 Labview 程式進行應變訊號擷取，實驗儀器架設如圖 3 所示。

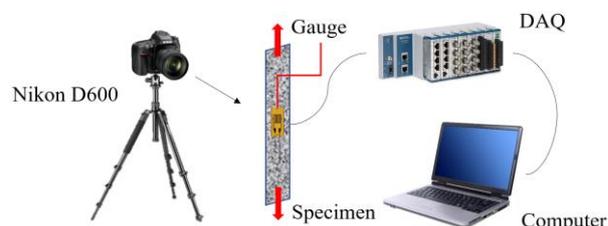


圖 3、應變驗證實驗儀器架設

影像之實驗架設如圖 4 所示，在鋁材的表面黏貼應變規並在其另一個表面以噴漆噴上散斑對其進行全域應變場的量測，藉此達到驗證影像應變量測的目的。

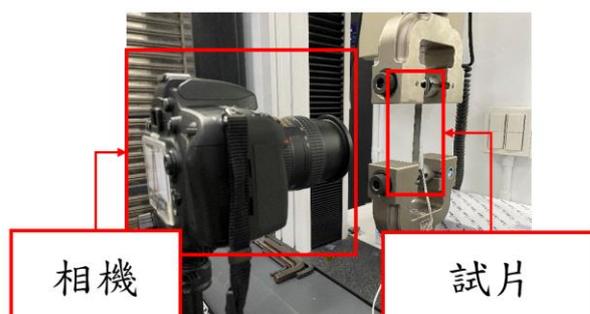


圖 4、相機以及試片之實驗架設

### 2.3 船體局部結構縮尺破壞預測實驗

在本研究中，我們透過數值模擬方法取出在極端海況下容易受到應力集中的船體部位，並且實際製作局部結構的鐵製縮尺模型進行試驗，其中，本研究將其分為兩個部分進行探討，首先為簡單結構，本研究將一般在船上常見的平板結構以及 C 行樑結構（如圖 5 所示），探討其在船上受拉以及受到彎矩兩種情況時，預測試片所發生的裂縫位置，接著我們也將數值方法所取出的兩個點位進行大型局部結構的縮尺實驗，其分別為船體結構的腋板以及甲板之開口處（如所示）進行縮尺結構製作。

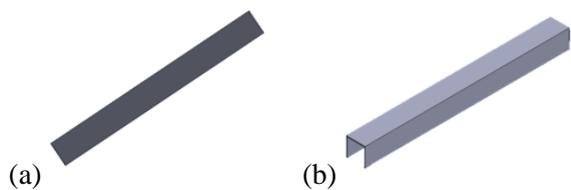


圖 5、(a) 無缺口之平板試片，(b) 缺口 C 型樑試片

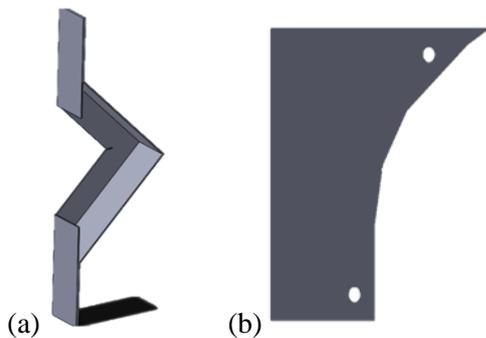


圖 6、(a)開口處之局部結構，(b)船體腋板局部結構

本研究在簡易結構的部分以無損傷的平板試片以及有缺口之 C 型樑進行量測，其中平板將透過全域應變場預測破壞發生位置，C 型樑則將驗證是否可以利用影像演算法提早預測裂縫破壞，而大型局部結構縮尺試驗的部分則在試片表面設計缺口，實際對其進行拉伸實驗，驗證是否能夠在一開始人眼尚未看不出差異時，即可由影像演算法預測裂縫破壞所發生之位置。

### 3. 結果與討論

#### 3.1 特徵點位移追蹤分析結果

在影像位移追蹤分析中，利用影像追蹤特徵點位移的方法分析衝擊實驗中鐵塊的摔落距離，利用 QRcode 做為追蹤的特徵區域，實驗之追蹤結果如圖 7 所示，由雷射測距儀所量測鐵塊的摔落路徑長度為 426 mm，而經由影像方法量測在摔落過程中特徵點的位移量值為 426.2 mm，其影像量測結果與雷射測距儀所量測之長度具有良好的一致性。

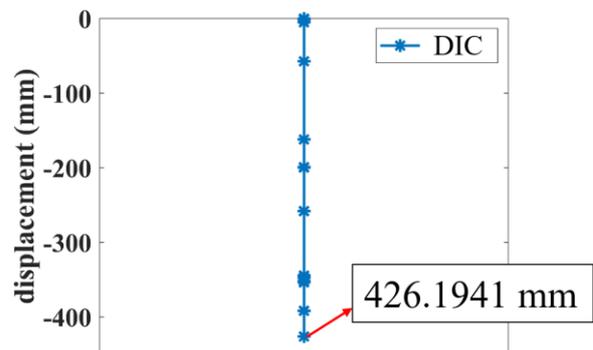


圖 7、影像方法所追蹤的特徵點位移長度

#### 3.2 影像應變場應變精度驗證實驗結果

在我們目前的影像位移亞像素量測精度為 0.1 pixel，在實驗結果中，我們由拉伸實驗中的試片位移場取出兩點進行降伏前試片所發生的均值應變計算，兩點取點位置如圖 8 所示，取點長度為 780 pixels，可換算得到經由影像方法所取得的應變樑測精度為 0.00012 mm/mm。

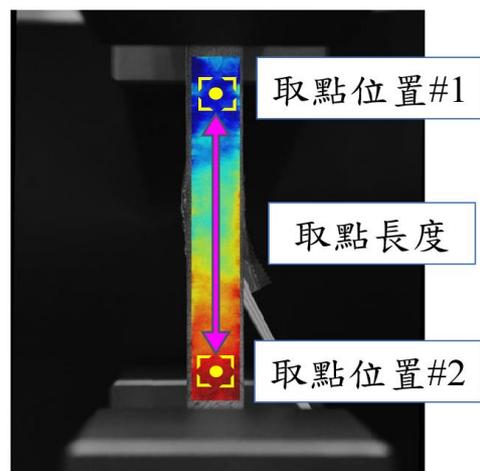


圖 8、實驗中自位移場之取點位置以及取點長度

本實驗中使用鋁材做為拉伸試片材料，經由量測所得到之材料應力應變圖如圖 9 所示，實驗中我們將其拉伸至降伏應變，並比對影像與應變歸之間的誤差。

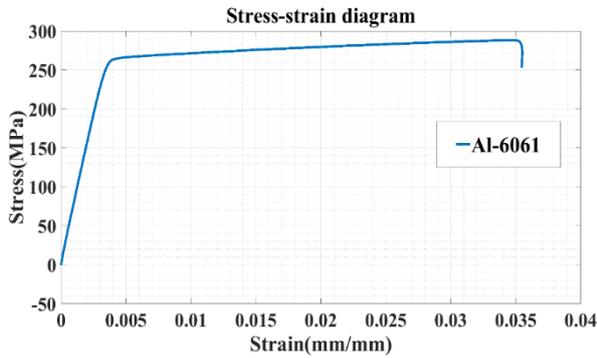


圖 9、實驗鋁材支應力應變圖

實驗之比對結果如下圖 10 所示，自開始拉伸起至結束影像量測的應變值皆與應變規具有良好的一致性，並且可由兩者之誤差結果探討影像辨識精度對於誤差的影響。

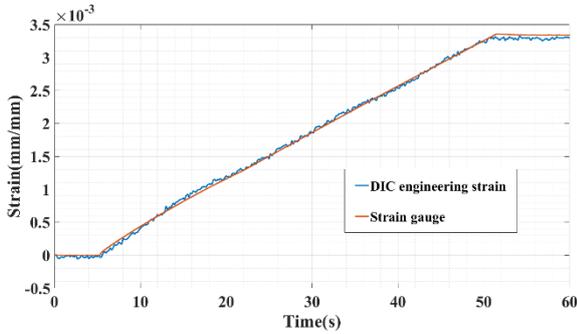


圖 10、影像量測應變值與應變規之比對結果

應變規與影像應變的誤差結果如圖 11 所示，因影像量測辨識精度為 0.00012 mm/mm，因此在量測結果中可以看到誤差範圍介於  $\pm 0.00012$  mm/mm 之間。

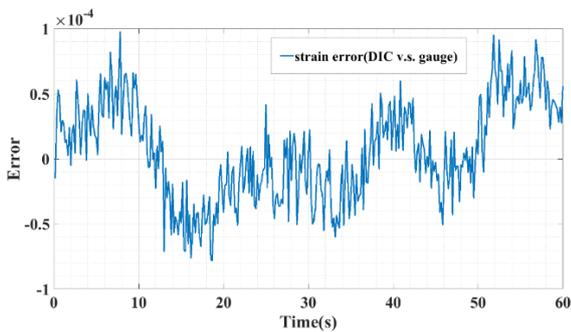


圖 11、實驗數據比對誤差結果

### 3.3 影像應變場應變精度驗證實驗結果

本研究取出船體之局部結構進行拉伸試驗，並且使用影像的全域應變場方法預測試片可能會發生破壞的位置。

在類別一簡單結構中，我們進行了無缺口平板以及缺口 C 型樑的拉伸以及彎矩實驗，在平板的拉伸試驗中，無缺口平板在第 90 幀幅時的影像如圖 12 所示，可以藉由影像的全域應變場看到試片發生應變集中的現象（如圖 13 所示），經由應變集中的位置可以預測最後在平板試片所發生的破壞位置（如圖 14 所示）。而 C 型樑試片可以在影像方法拍攝第 11 幀幅時（實驗影像如圖 15 所示），由圖 16 的全域應變場方法經由應變極大值預測在後續可能會發生破壞的位置，而最後發生破壞的位置也與影像方法的辨識結果相同（破壞位置如圖 17 標註所示）。

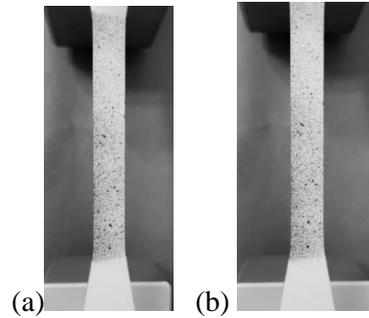


圖 12、平板拉伸實際拍攝之實驗影像，(a) 第 90 幀幅，(b) 第 130 幀幅

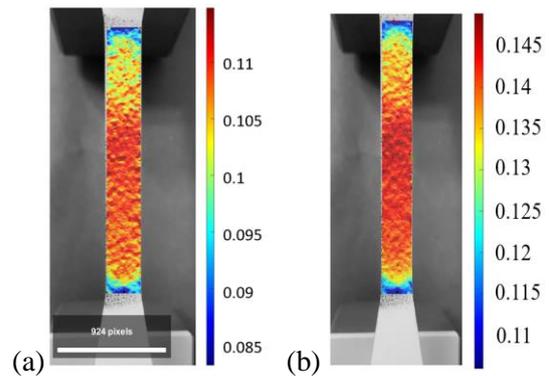


圖 13、影像全域應變場所檢測的平板結構表面，(a)第 90 幀幅，(b)第 130 幀幅

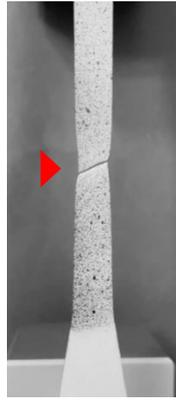


圖 14、試片最後發生破壞的位置

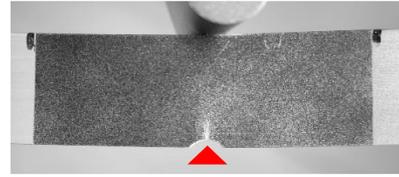


圖 17、C 型樑試片最後所發生破壞的位置

而在類別二的實驗中，本研究由數值模擬的結果找出船體容易受到應力集中的局部結構進行縮尺局部結構實驗，分別取箱型結構中的腋板結構以及甲板上的開口處來進行局部結構實驗，實驗結果如下，圖 18 為實驗中實際拍攝的開口處結構，可由全域應變場預測破壞可能發生位置。

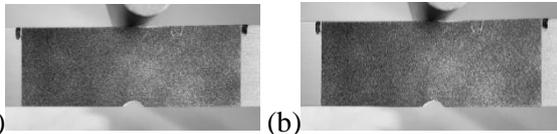


圖 15、C 型樑彎矩實驗中實際拍攝之實驗影像，(a) 第 11 幀幅之實驗影像，(b) 第 14 幀幅之實驗影像

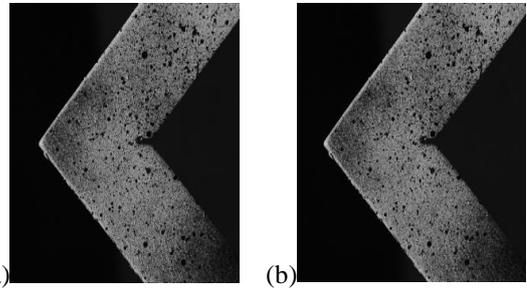


圖 18、開口處影像，(a) 第 11 幀幅，(b) 第 15 幀幅  
在影像辨識的結果中，可以看到在第 11 幀幅時，試片的表面已經有出現應變集中的情形（如圖 19 所示），且在此時，應變最大值發生位置與最後開口處發生破裂位置相同（如圖 20 所示）。

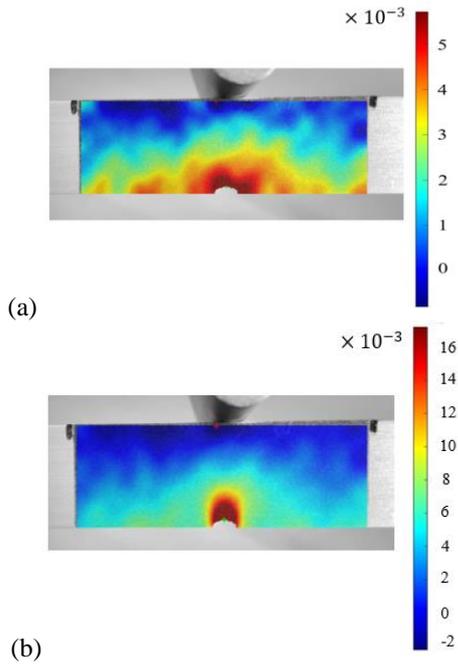


圖 16、影像全域應變場所檢測的 C 型樑結構表面，(a) 第 11 幀幅，(b) 第 14 幀幅

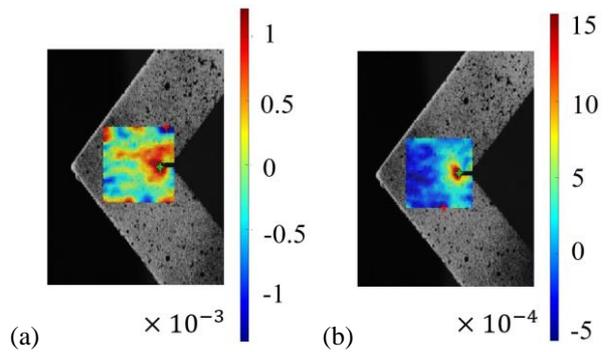


圖 19、影像全域應變場所檢測的開口處結構表面，(a) 第 11 幀幅，(b) 第 15 幀幅

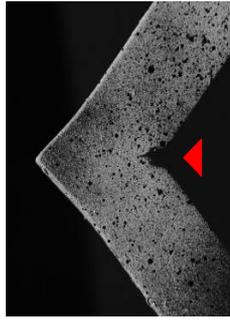


圖 20、開口處結構破壞發生位置

本研究也針對箱型結構中的腋板進行破壞預測分析，進行兩組試片的實驗，其分別對其進行 5 mm 以及 1 mm 的缺口，其中，5mm 的腋板試片拍攝影像如圖 21 所示，1 mm 的腋板試片拍攝影像如圖 22 所示。

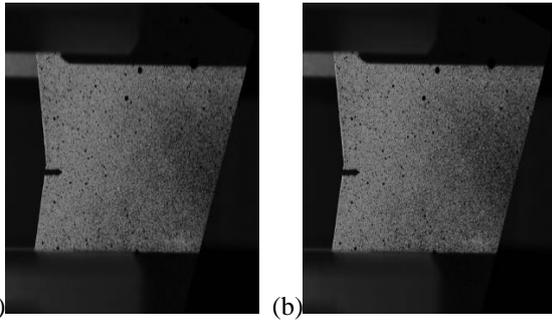


圖 21、5 mm 缺口腋板影像，(a)第 41 幀幅，(b)第 50 幀幅

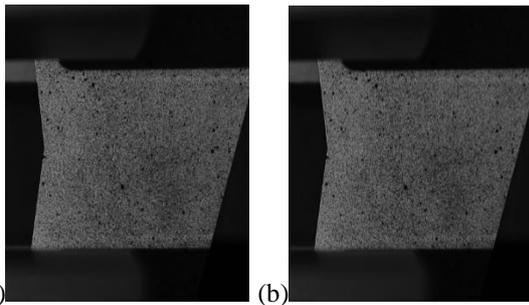


圖 22、1 mm 缺口腋板影像，(a)第 41 幀幅 (b)第 50 幀幅

由圖 23 的結果全域應變場中可以在 5 mm 缺口的腋板發現應變集中的位置（如圖 23 所示），在第 19 幀幅時便可以經由全域應變場的應變最大值預測其破壞發生位置（如圖 25 所示），而 1 mm 缺口的試片則可以在第 41 幀幅時由全域應變場發現應變集中的位置（如圖 24 所示），可以發現在 1 mm 缺口

的試片中，應變場的集中效果未有 5 mm 試片的應變及中來得明顯，但仍舊可以從最大值預測破壞發生位置（如圖 26 所示）。

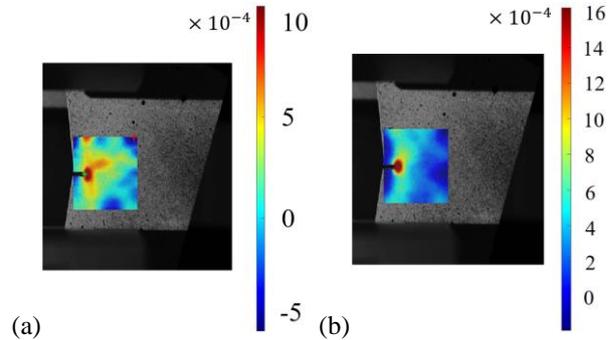


圖 23、影像全域應變場所檢測的 5 mm 缺口腋板結構表面，(a)第 19 幀幅，(b)第 28 幀幅

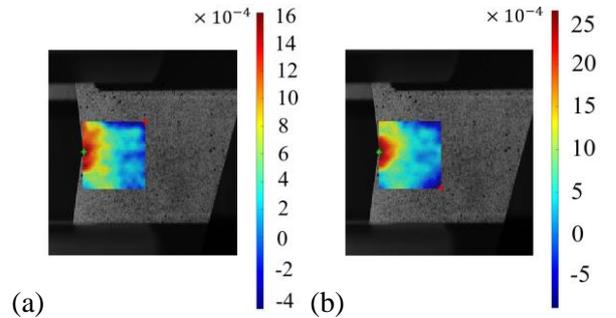


圖 24、影像全域應變場所檢測的 1 mm 缺口腋板結構表面，(a)第 41 幀幅，(b)第 50 幀幅

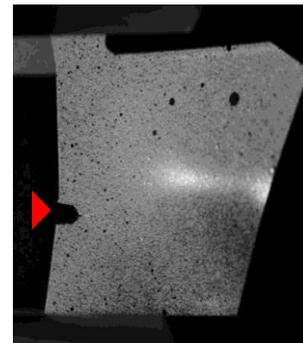


圖 25、5 mm 缺口腋板結構破壞發生位置

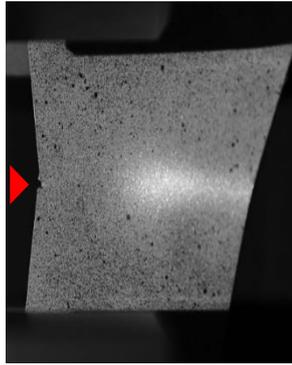


圖 26、1 mm 缺口腋板結構降伏破壞發生位置

在 3.1 小節中，驗證影像方法所追蹤之位移量與雷射位移計所量測的位移量相符，證實了船體上追蹤特徵點兩側位移以及變型量的可行性，在應變量測的主題上，在 3.2 小節中，本研究也利用應變規做為驗證工具證明影像量測船體鐵材降伏前應變的可行性，在 3.3 小節中，我們以船體上常見的平板以及 C 型樑結構進行實驗，以全域應變場預測破壞可能發生的位置，除了簡單結構外，在 3.4 小節中，我們也將影像方法與數值模擬方法進行結合，利用數值方法找出在船體結構中，容易發生應力集中的區域結構，將其擷取出進行方法驗證，結果證實經由影像方法的檢測後，可以在人眼尚無法辨識時，便可以由視覺影像的全域應變場結果預測在後續裂縫破壞可能會發生的位置，藉此可達到以視覺影像方法進行船體結構健康監測的目的。

#### 4. 結論

本文探討影像視覺方法應用於船體進行結構健康監測的可行性，其中探討主題包括影像位移以及變形量的量測，以及利用影像量測結構表面應變藉此預測破壞可能發生位置，未來在實際應用的環境

中，可利用低成本之消費型相機，因其具有防水以及無線傳輸的特性，可以在極端海況下，即時且全域的監測船體是否有遭受到因外力所受到的變形，藉此保障船上人員的安全。而船體在極端海況，也容易會受到舢拱及舢垂的影響，進而可能會對於船上結構因疲勞影響產生結構裂縫，利用全域應變場的量測方法，實時或是定期拍攝結構表面，可確保結構材料是否已經降伏，亦可以預測裂縫可能會發生的位置，協助人員及早發現並且預測損壞，達到結構健康監測的目的。

#### 參考文獻

1. B. Pan, K. Qian, H. Xie, and A. Asundi, "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review," *Measurement science and technology*, vol. 20, no. 6, p. 062001, 2009.
2. 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.
3. B. Pan, K. Li, and W. Tong, "Fast, Robust and Accurate Digital Image Correlation Calculation Without Redundant Computations," *Experimental Mechanics*, vol. 53, no. 7, pp. 1277-1289, 2013, doi: 10.1007/s11340-013-9717-6.
4. B. Pan, D. Wu, and Z. Wang, "Internal displacement and strain measurement using digital volume correlation: a least-squares framework," *Measurement Science and Technology*, vol. 23, no. 4, 2012, doi: 10.1088/0957-0233/23/4/045002.
5. Z. Zhu, S. Luo, Q. Feng, Y. Chen, F. Wang, and L. Jiang, "A hybrid DIC-EFG method for strain field characterization and stress intensity factor evaluation of a fatigue crack," *Measurement*, vol. 154, 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.107498.
6. 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, doi: 10.1007/s11340-015-0009-1.

## **APPLIED VISION SENSOR INSPECT SHIP DEFORMANTION AND CRACK DAMGE**

*C. Y. Lin\* C. F. Lee\*\* C. C. Wu\*\* H. H. Huang\**

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

\*\*CR Classification Society

*Keywords: SHM, Digital Image Correlation, Vision Inspection system, Damage analysis*

### **ABSTRACT**

Under different sea conditions, ships will have different structural deformations, including arching and sagging deformation, and wave condition is a type of long-term loads, which may cause fatigue cracks in the hull structure. In this study, the non-contact image monitoring of the hull structure was carried out to find out the possible structural failure modes and damage locations of the hull structure during the voyage. Most of the traditional hull monitoring methods today use strain gauges, and the analysis system of strain gauges requires huge deployment costs and huge manpower to collect data. In this study, the image method is used for non-contact measurement, which has a flexible way to use, and can also monitor the possible damage locations of the current sea conditions at any time, so as to use resources more effectively. The image tracking method developed in this study can analyze the feature points of the hull structure, and use the pixel displacement of the feature points to convert the scale factor to obtain the dent deformation of the structure. By identifying the stress concentrations on the surface of the structure, it is possible to predict cracks and where failure is likely to occur. In this study, the digital image correlation method is used to develop an image structure monitoring method. Through the linear relationship between pixels, the sub-pixel tracking accuracy can be achieved, so it can break the traditional limitation that the previous image can only achieve the highest accuracy of the whole pixel solution. In addition, by establishing the global displacement field of the surface, the global strain field of the surface can be calculated by using Lagrangian transformation of the global displacement field.