

應用先進光學感測及量測技術於複材風機結構的預兆診斷

本篇論文應用布拉格光纖光柵 (FBG) 與數位影像相關法 (DIC) 兩項技術來建構精密的實驗量測方法，FBG 具有多點及微應變 (Microstrain) 的量測精度，且可同時量測溫度，DIC 亦具有微米級 (Micrometer) 的位移量測精度，是全域式的三維變形量測技術。文中先以兩種精密量測技術，進行複材懸臂板模擬風機葉片受力及受溫度加載的全場三維變形量測，以及承受撞擊的動態應變量測，進行瑕疵檢測，進而針對與風機結構相似的電風扇進行動態量測，並以頻譜的特徵來診斷產生的振動因素，最後針對實體複材風機葉片結構進行量測與分析，並提出可行的瑕疵檢測方法，期望精密量測技術可應用於實際風機運轉時的瑕疵檢測。

■ 馬鈺棠、何昭慶

關鍵詞：微米級精密量測、布拉格光纖光柵、數位影像相關法、風機葉片、預警系統

非破壞量測技術可以偵測結構中的瑕疵，進而增加系統設備的使用壽命，並且保障產品的安全可靠度，因此非破壞檢測在工業上的應用範圍及重要性與日俱增。布拉格光纖光柵感測器 (FBG) 具有低成本、高靈敏度、多點的量測能力以及不受電磁波干擾等優勢，光纖光柵為具有可撓性的細長線狀感測器，不僅能夠安裝於狹小的極端區域，亦可埋入結構物中進行長期監測，記錄其受力及溫度而產生變形的變化，確保結構之完整性與安全性。光纖光柵以光訊號進行傳輸，不會受到環境的電磁波所干擾，且有長距離傳輸訊號的優勢，同時也具有耐腐蝕與抗高溫的能力，適合在惡劣的環境中工作，而不影響其感測能力，保持其高精密度與高準確度。目前對於光纖光柵感測器的研究大多著重在單一物理量的量測，而本文基於光纖光柵可解析多場耦合物理量的特性，開發多點動態及熱學的感測器，針

對結構的共振頻率、溫度及熱膨脹係數進行精密量測及分析，並應用在複材結構瑕疵的檢測。(龔瑞清, 2017) (廖尉翔, 2022)

數位影像相關法 (DIC) 是一種非接觸且全域式的量測技術，僅需相機的硬體設備，且其量測系統的架設與校正簡單，可配合不同的取像設備達成跨尺度及跨領域量測，並且可同時量測多重物理量，結合多台相機亦可達成三維的全場量測，為全方位之量測技術。近年來取像設備的迅速發展，使得數位影像的取得越來越便利，且使用影像量測具有前述等優勢，因此吸引國內外許多學者及產業界投入 DIC 的研究與技術開發。本文應用本實驗室自行開發的數位影像相關法量測系統，並利用 DIC 非接觸及多尺度的全场量測優勢，分別量測有瑕疵與無瑕疵複材結構於單點受力或熱負載的全場三維位移變化，結構變形量從毫米至微米的跨尺度特性，皆可以得到精密的量測結果，並將單點

面外力位移與雷射位移計驗證，熱變形的量測結果則配合熱電偶，計算熱膨脹係數達成相互的驗證。由全場三維變形全場量測的結果，直接偵測缺陷的所在位置。(Puri, 2008) (R.Wu, 2019)

並進而以直立型風扇模擬風機系統，搭配光纖光柵感測器及數位影像相關法量測風扇運轉時的動態響應，分析電風扇在不同運轉條件下的動態應變訊號與頻率等特徵，並以 DIC 量測振動頻率後與轉速計進行比對，探討系統本身的振動頻率及葉片轉速頻率特性。研究最後並應用於實際小型風機葉片的動態量測及瑕疵檢測上，以四顆螺栓將葉片固定於光學桌上，進行小型風機葉片特性之研究，設計不同位置與不同種外力加載於葉片的應變量測實驗，包括自由振動，載重自由振動、敲擊振動、風襲振動、螺栓鬆緊應變等實驗，特別針對螺栓鬆脫的狀況進行深入的探討，研究個別螺栓的鬆緊對葉片固定端造成的應變影響，而由所獲得的風機葉片系統共振頻率的變化可運用在風機葉片螺栓的鬆緊的判斷。

本文結合光纖光柵感測器及數位影像相關法精密量測複材結構的變形，並快速評估複材結構的瑕疵及監測結構的損傷，建立快速且經濟非破壞瑕疵的檢測方法，可協助製造業者分析工件瑕疵及大型結構長時間的監測與壽命評估等。

布拉格光纖光柵量測複材熱學及含瑕疵動態特性

本章研究以風機葉片所使用的複合材料為主題，利用光纖光柵進行不同量測實驗。對不同纖維排列的複合材料進行加熱的熱變

形實驗和鋼珠撞擊懸臂薄板的動態實驗，並經由頻譜的特性來檢測含瑕疵複合材料的可行性，並在後續章節有關複材風機葉片的瑕疵檢測實際應用。

一、布拉格光纖光柵原理

布拉格光纖光柵 (Fiber Bragg Gating; FBG) 是由三層不同折射率的材料以軸對稱的圓柱結構組合而成。根據司乃爾定律 (Snell's Law)，纖殼和纖核之間不同的折射率關係使光在纖核內進行全反射傳播，利用紫外光在光纖纖核上蝕刻形成短週期光柵，當光纖受力產生伸縮或是溫度改變時，光柵間的距離產生變化，而纖核共振中心波長也隨之飄移，因此可以利用光纖光柵波長飄移的特性，量測待測物之應變、溫度及動態訊號。

二、複合材料熱學性質溫升及熱膨脹係數量測實驗

本小節先探討複合材料懸臂薄板的熱學性質，量測複合材料結構物在升溫過程中的熱應變變化，同時搭配熱電偶記錄溫度變化。結果顯示光纖光柵的波長漂移量可用來量測溫度變化及熱變形，並可進一步分析獲得複材結構不同方向之熱膨脹係數，此實驗亦將探討瑕疵對於複材結構的應變變化與熱膨脹係數影響，作為結構物損傷的監測指標。

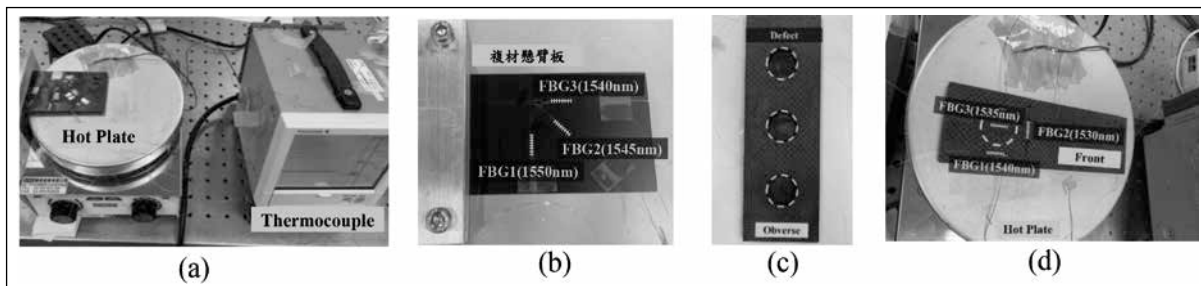
(一) 實驗架設

圖一 (a) 為實驗一架設示意圖，將碳纖維複合材料薄板黏貼於金屬夾層塊上端形成懸臂板，並在下方放置加熱盤，複材薄板上端貼有光纖光柵與熱電偶的溫度量測探頭。圖一 (b) 為三條光纖光柵黏貼在複材懸臂薄板上的位置及方向，分別為垂直黏貼

的 FBG1、傾斜黏貼的 FBG2 及水平黏貼的 FBG3，光柵段旁都同時黏貼熱電偶進行溫度測量。

實驗二使用碳纖維複合材料厚板，並在試片背面鑿不同深度及寬度的圓孔洞（圖一 (c)），在其中一個底部有孔洞的複材表面

黏貼光纖光柵，使其光柵段通過缺陷中心 (FBG3)，再黏貼水平與垂直各一條光纖光柵如圖一 (d)。加熱試片至 75°C 後關閉加熱盤電源進行降溫，探討光纖光柵在有無缺陷的試片表層所量測的波長飄移與熱膨脹係數量值。



圖一 (a) 實驗一架設圖 (b)FBG 黏貼位置 (c) 複材孔洞位置 (d) 實驗二架設圖

(二) 實驗結果

經由實驗一結果顯示測得 FBG 波長漂移數據與熱電偶測得的溫升結果有高度的關聯性，進行擬合也展現完全的一致性，數據經過計算後所得熱應變的時間歷程及熱膨脹係數數值。實驗結果顯示 FBG1 的熱膨脹係數為 $21.4 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ ；FBG2 的熱膨脹係數為 $14.4 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ ；FBG3 的熱膨脹係數為 $0.54 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 。值得注意的是垂直黏貼的 FBG1 與水平黏貼的 FBG3 熱膨脹係數有約 40 倍的差值，與電子顯微鏡觀察到的纖維排列方式特性符合，結果顯示沿著懸臂板長邊方向複材的熱伸長量極小，溫度每升高 1 度僅產生 $0.53 \mu\text{m}$ 的熱伸長量。

實驗二量測結果如圖二 (a)，可以看到光纖光柵的波長飄移曲線與熱電偶的溫度變化曲線亦幾乎完全重合，顯示 FBG 可量測溫度升降的變化結果。亦可得光纖光柵在有缺陷區域 (FBG3) 的熱膨脹係數為 $1.81 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 較沒缺陷的位置 (FBG1 及 FBG2) 的熱膨脹係數 ($1.66 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 與 $1.29 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$) 大，

因此證明光纖光柵可以進行溫度的量測，也可藉由熱膨脹係數量值判斷缺陷是否存在。

三、撞擊動態應變及共振頻率分析實驗

受損的材料經撞擊後會呈現不同的共振頻率，經由複合材料薄片一邊夾持固定後，進行不同長度的割痕瑕疵及鋼珠進行不同位置的撞擊，經由光纖光柵感測器獲得動態應變，探討複材試片在有瑕疵時的共振頻率變化。

(一) 實驗架設

圖二 (b) 為實驗儀器架設圖，將懸臂薄板的金屬固定塊鎖固於光學桌上，並架設一斜坡軌道使鋼珠撞擊懸臂薄板不同的三個位置，每次新實驗都會在固定端增加割痕，總共有 5 種不同形式的割痕，以持續增加割痕長度進行實驗量測。如圖二 (c) 中黃色虛線所示，量測貼附的三條不同方向的光纖光柵波長變化結果，並經由快速傅立葉轉換繪出共振頻率，探討割痕瑕疵對懸臂薄板共振頻率的影響。

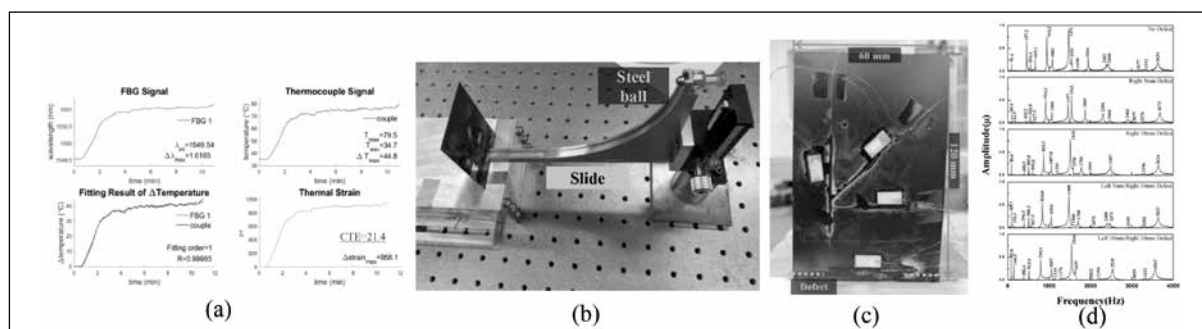
(二) 實驗結果

實驗結果呈現不同割痕瑕疵分析的前五個完整共振頻率，並列出三條 FBG 於三個不同鋼珠撞擊點的前五個共振頻率，把每條相同的共振頻率進行平均值計算，顯示共振頻率在不同的撞擊點與量測點所得的數值幾乎一致，也符合共振頻率的原理及特性。

經過鋼珠撞擊後的複材薄板所激發的時域動態應變訊號，響，而右邊為時域訊號經

過快速傅立葉轉換 (FFT) 後的頻域訊號圖。

可以由圖中所呈現的結果發現，經由比較不同種類的缺陷且相同撞擊點的結果，懸臂薄板不同缺陷的共振頻率差異，每增加新的缺陷，整體的共振頻率都會明顯減少許多。最上方為無割痕的頻域圖，由圖二 (d) 中顯示撞擊點 1 所激發的第一共振頻率作比較，從無割痕的 91.4 Hz 下降至 89.9、86.6、85.7、82.8 Hz，其他共振頻也有類似的結果。



圖二 (a) 熱膨脹係數擬合 (b) 實驗架設圖 (c) FBG 及瑕疵位置 (d) 頻域結果圖

由此實驗可知，藉由不同量測點與撞擊點所提取的共振頻，都可以用來判斷試片是否有損壞的依據，共振頻率是反映結構的動態特性，而共振頻率的變化直接與缺陷大小及數量相關，故缺陷的狀態可由結構物共振頻來作監測。

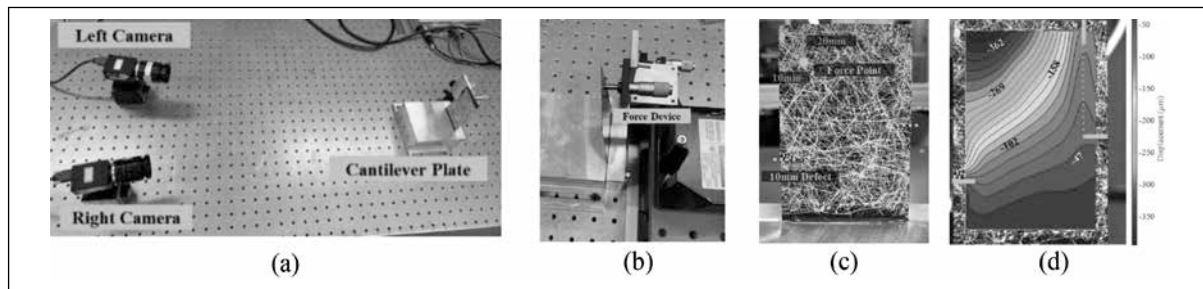
應用數位影像相關法於複材結構全場精密變形量測

一、懸臂複材薄板受力加載的三維變形量測

本小節將數位影像相關法 (DIC) 應用在懸臂複材薄板的全場靜態位移量測，分析懸臂薄板受到單點施力後的全場變形。DIC 可以在比較嚴格要求的環境下進行量測，需要先進行鏡頭校正後才可開始進行取像與分析特徵點的位移量測。

(一) 實驗架設

實驗架設如圖三 (a) 所示，我們將長方形複材試片底邊固定於夾具中，並鎖固在光學桌上，試片表面使用白色噴漆造成交叉線條特徵做為 DIC 追蹤的特徵。試片後方架設螺旋測微器，可以進行精準位移推進，如圖三 (b)。試片前方架設兩台工業相機，搭配鏡頭架設於試片前的左方與右方，實驗前需要先校正工業相機鏡頭，並在黃色虛線處製造三條裂痕，如圖三 (c)。一共追蹤長邊 10 個點與短邊 9 個點，共 90 個點的三維位移數據，並繪製出全場位移結果的變形圖。推力變形實驗主要使用螺旋測微器進行固定距離的推進，每次推進完就使用雙相機進行取像，共有 5 次，每次增加螺旋測微器轉動一圈的推進距離 (0.5 mm)。



圖三 (a) 力變形實驗架設圖 (b) 螺旋測微器 (c) 瑕疵位置 (黃虛線) (d) 三瑕疵力變形結果

(二) 實驗結果

無缺陷的全場位移變形量測結果在靠近固定端的區域有較小的位移量，顯示複材懸臂板在試片下方為固定端位移為零的邊界條件，而在靠近施力點的左上角頂端有最大的位移，因為那裡為受力推進的上方區域。

單一缺陷位於試片左下角，有很明顯在缺陷附近有更集中的位移變化，而隨著推進圈數越多，位移場就越往瑕疵處聚集，清楚展現缺陷對於三維全場位移的影響；兩個缺陷位於試片左下角及右上角的受力變形全場位移量測結果，不論在第幾圈的推進實驗，三維全場的位移與一個缺陷的位移場呈現一致的趨勢，原因推測是缺陷與纖維排列方向相同所以沒有造成明顯位移場；三個缺陷的受力變形 Z 方向量測結果如圖三 (d)。在試片右邊中間製造出一處缺陷，可以看到圖中的右上角就有由中下方延伸到上方的等值線，那是因為複材纖維排列方向與兩處缺陷所造成的皺褶，垂直缺陷與皺褶處卻有造成三維全場位移的增大及變化。

二、懸臂複材薄板受熱三維變形量測

(一) 實驗架設

本小節探討溫度變化時缺陷對複材結構全場熱變形造成的影響並討論缺陷位置的檢

測。實驗架設如圖四 (a) 所示，將複材懸臂板後方放置加熱圓盤並對其進行加熱，在固定端、試片上端黏貼熱電偶同時進行量測，並在複材試片前方架設兩台相機，取樣時間設定為 3 秒取 1 張影像，量測時間約 1800 秒，前 450 秒為加熱盤加熱的時間，剩下約 1350 秒為關掉加熱裝置後進行降溫，而圖中也有分析 9 個點的位移隨時間變化之熱變形詳細歷程，並做成位移與時間曲線圖，可以完整呈現整個實驗的時間與位移變化。

(二) 實驗結果

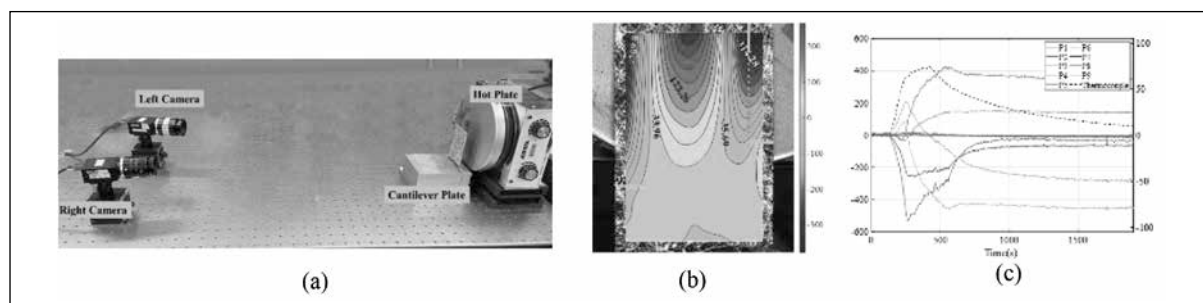
無缺陷全場熱變形，X 方向的變形沿長邊中軸兩邊反對稱；Y 方向的變形由固定端向自由段遞增且沿長邊中軸左右對稱；Z 方向則呈現沿長邊中軸左右對稱的趨勢。比較三種方向量測結果，Y 方向的變形量遠小於 X 方向，而由 FBG 量測得到的熱膨脹係數呈現 Y 方向遠小於 X 方向，兩種量測方法獲得一致的結果，故複材懸臂板沿著纖維方向基本不產生熱變形，而沿 Z 方向則產生頗大的熱翹曲變形。

一個缺陷的實驗結果，三個方向皆有較大的變形量，而缺陷也破壞了變形場的對稱性，在平行缺陷附近有較大且明顯的位移場變化，且在缺陷上方區域展現劇烈的位移變化。

二個缺陷的實驗同時存在水平與垂直缺陷三維全場熱變形的量測結果，顯示比僅具有 1 處缺陷整體呈現較大的全場變形，平行缺陷對於複材結構的熱變形有較顯著的影響，且可由全場的變形圖直接觀察得知平行缺陷的位置，而垂直缺陷對於複材結構的熱變形則影響較不明顯。

最後在複材懸臂板右端中間再增加一處的水平裂縫，其全場熱變形及九個點的位移

量值呈現於圖四 (b)、(c)，由全場三維熱變形圖中顯示三個缺陷的全場變形圖與兩個缺陷有非常大的變化，明顯呈現第三個缺陷所造成的影響，呈現左右對稱的特性。尤其是 Z 方向的翹曲現象，不論是無缺陷或是一處及兩處缺陷全場皆是負值，表示翹曲的方向皆相同，但三處缺陷則全場有正值（中央區域）及負值（兩邊區域），表示翹曲的方式及現象更為複雜。



圖四 (a) 熱變形實驗架設圖 (b) 三瑕疵熱變形結果 (c) 不同點位移隨時間變化圖

應用電風扇模型之動態量測模擬風機

本章將兩項量測技術相互驗證，分別量測動態位移及動態應變，並經由快速傅立葉轉換 (FFT) 分別獲得電風扇各結構部位的共振頻率，經由本章的量測結果及訊號解讀，期望可應用於提取實際風機運轉時的感測器訊號並獲得風機運轉時的相關重要資訊，分析風機葉片及支承結構的振動頻率等，證實風力發電機運轉有可量測的規律性與風機可行的量測與監測方法。

一、數位影像相關法應用於電風扇運轉量測

(一) 實驗架設

數位影像相關法實驗的系統架設如圖五 (a) 所示，本實驗使用二維的 DIC 量測方式，故僅需使用一台工業相機與筆記型電腦連結，可由圖片左上方的筆記型電腦中顯示

工業相機的取像範圍，並分別在電風扇上方馬達黏貼 1 張 QR code，而支撐軀幹的結構上、中兩處各黏貼一張 QR code。

實驗一次的取像時間總長為 21 秒，共擷取 1200 張的圖像進行分析，2D-DIC 的量測座標系統相機的橫軸方向是 DIC 量測的 X 軸方向位移，而縱軸是 Y 軸方向位移。共使用 3 種不同的電風扇運轉速度進行實驗，分別為低轉速、中轉速及高轉速，這三種不同轉速是配合電風扇可控制三種不同的風速作切換，本實驗也進行受到旁邊另一台電風扇風力吹襲影響的實驗架設，此為模擬風力發電機受環境風吹的情境，為了驗證數位影像相關法量測的準確性，我們在電扇葉片上黏貼一銀色亮片，並使用轉速計量測電風扇三種不同運轉速度的葉片轉速，並與 DIC 量測的結果作相互驗證。

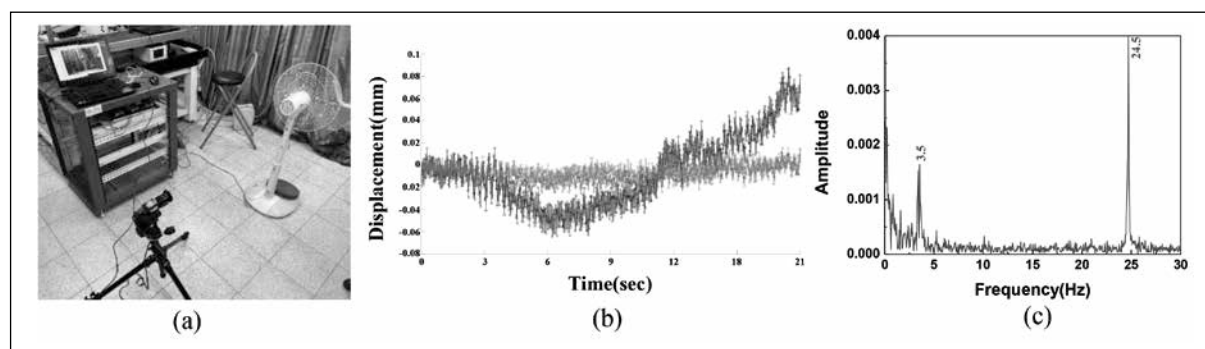
(二) 實驗結果

將電風扇前罩移除，為了避免前罩的結構阻擋電風扇運轉時風的送出，而造成反作用力影響實驗結果，也較適宜模擬實際風力發電機運轉的狀態，亦在電風扇底部使用重鐵塊進行重量施壓，可穩定並降低電風扇本身運轉的震動而造成整體搖晃影響。

圖五 (b) 為量測出來的時域訊號結果，X 方向的水平位移會有無規律的振幅變化，最大達 0.08 mm 的低頻位移量，經 FFT 轉換

後的頻域結果如圖五 (c) 所示，利用 2D-DIC 進行頻率量測的結果都與轉速計相近，相差值約僅為 1 Hz。低中高轉速所量測出來的頻域訊號峰值都有其轉速值與 3Hz 左右的頻率，應是電風扇整體結構振動的頻率。

而使用另一台電風扇在左邊進行不同風速的吹襲實驗結果，在頻率域中並沒有呈現前面葉片運轉時的高頻頻率，僅有一低頻約 3.0Hz，與先前實驗相似，應是電風扇整體結構振動的頻率。



圖五 (a) 風扇 DIC 實驗架設圖 (b) 時域結果圖 (c) 頻域結果圖

二、布拉格光纖光柵應用於電風扇運轉量測

由上節數位影像相關法的結果可知，電風扇整體結構振動的頻率為 3 Hz 左右，另一個共振頻率則隨著轉速有不同的頻率結果，而布拉格光纖光柵又相較 DIC 的量測精細且取樣頻率更高，因此藉由接下來的光纖光柵量測實驗可以有不同的結果進行相互比較探討。

(一) 實驗架設

拆解風機前罩後將布拉格光纖光柵黏貼在幾處電風扇結構關鍵的地方，分別為電風扇的支撐塔架軀幹上；風扇馬達外殼上方平行與垂直；電扇葉片轉軸附近，共 4 條光纖光柵，每條的詳細位置如圖六 (a) (b)(c)。本次實驗共量測 20 秒，取樣頻率為 37500 Hz。

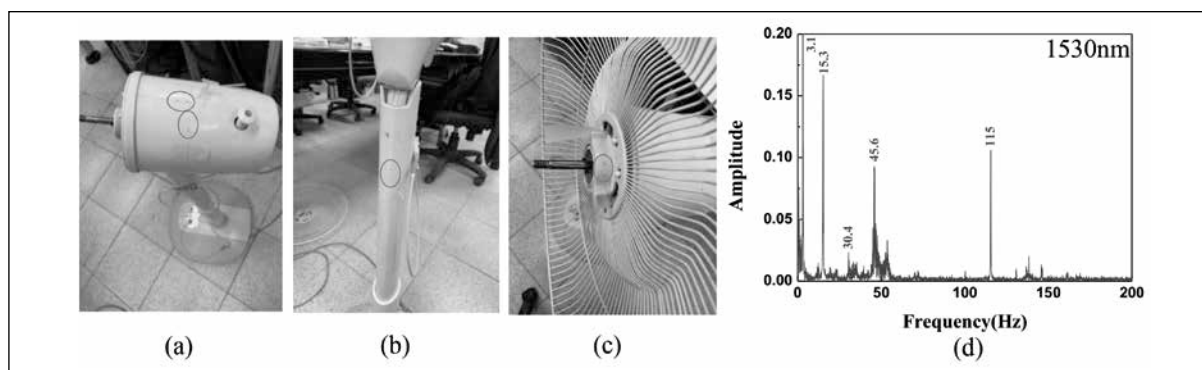
(二) 實驗結果

電風扇動態應變的時域訊號結果顯示，應變的量值非常小，僅有幾個 $\mu\epsilon$ 動態應變的變化，但光纖光柵感測器仍可清楚呈現結果，對應低、中、高轉速時電風扇葉片旋轉的頻率，這些頻率在以下的頻譜分析結果中也會清楚顯示。

圖六 (d) 為電風扇低轉速的實驗結果，分別將 1530 nm、1540 nm、1545 nm、1555 nm 的四條光纖所量測出的時域結果經傅立葉轉換後的頻域結果，可以看到除了上章節提到的系統振動頻率 (約 3 Hz) 與該轉動速度振動頻率 (約 15 Hz) 外，在 200 Hz 的頻率範圍，還有 30 Hz、45 Hz 與 115 Hz 為 4 條 FBG 都有出現的共振頻率，風機旋轉

片有 3 片，因此 30 Hz 與 45 Hz 推測為原本 15 Hz 的 2 倍頻與 3 倍頻，而 115 Hz 在接下

來的實驗中均有出現，推測為馬達的轉速震動所造成的。

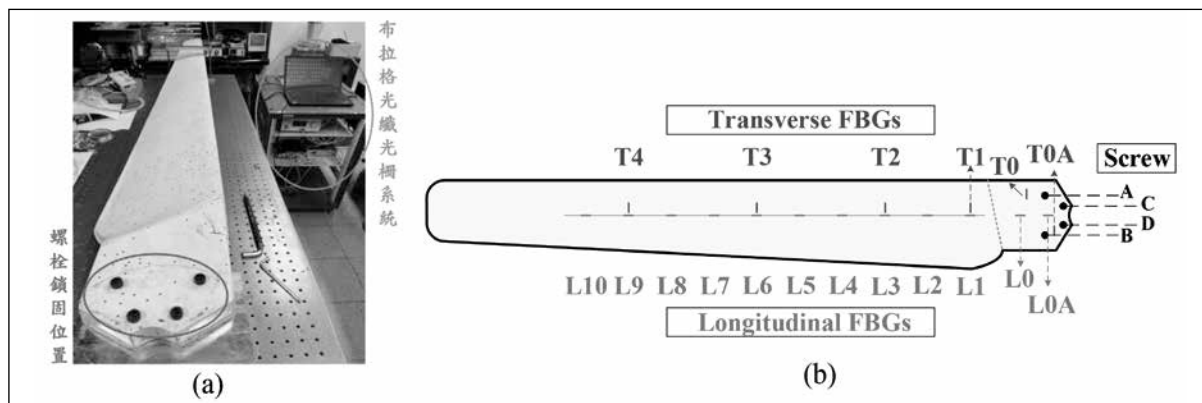


圖六 (a)(b)(c)FBG 黏貼位置 (紅框處) (d) 頻域結果圖

布拉格光纖光柵小型風機葉片量測

首先介紹 FBG 黏貼於風機葉片的位置，本章所有實驗中光纖光柵都是按照此黏貼的位置進行數據的量測及分析。實驗的系統架設如圖七 (a) 所示，風機葉片總長約 210 公分，將風機葉片固定端用螺栓鎖於金屬塊上，並將金屬塊固定於光學桌上，使葉片形成除了固定端外都懸空的狀態，以模擬風機葉片運轉時的狀況，葉片端幾乎都是懸空於光學桌上，並在風機葉片表面黏貼 18

段光纖光柵，須注意的是這 18 段光纖光柵的共振波長皆不同。葉片的固定端有黏貼 4 條 FBG 如圖七 (b)，其中 L0 及 L0A 為水平黏貼於葉片方向的 FBG，而 T0 及 T0A 為垂直於葉片方向的 FBG，葉片上懸空段則黏貼有 14 條 FBG，分別是 L1~L10 為水平方向、T1~T4 為垂直方向。值得一提的是 L1~L10 為同條光纖上不同位置的 10 段光柵，表示有 10 個量測點。



圖七 (a) 葉片量測系統架設圖 (b) FBG 黏貼位置示意圖

一、單顆螺栓鬆脫後鎖固之應變時間歷程

進行螺栓的鬆緊對於葉片固定端貼附的光纖光柵應變影響實驗。本節的實驗為風機葉片被自身的重力與固定端螺栓鬆緊造成

支撐條件影響而改變的應變，我們只針對固定端的螺栓進行不同的鬆緊調整，葉片整體應變所產生的變化需由精準的應變量測進行分析。而此實驗設計就是研究其中的應變關

係，進而可由光纖光柵所量測應變的變化來判斷螺栓鬆緊的狀況及程度，以監測風機葉片運轉時的安全性。

(一) 實驗架設

本實驗為分別鬆脫 A、B、C 與 D 螺栓，實驗流程為鬆脫螺栓並再轉緊，完成後再重複一次，全程約為 110 秒。鎖緊的定義為我們使用電子扭力扳手鎖緊至螢幕顯示 15 N·m 的扭力為止，而轉鬆的定義為扭力板手顯示 0 N·m 的扭力。

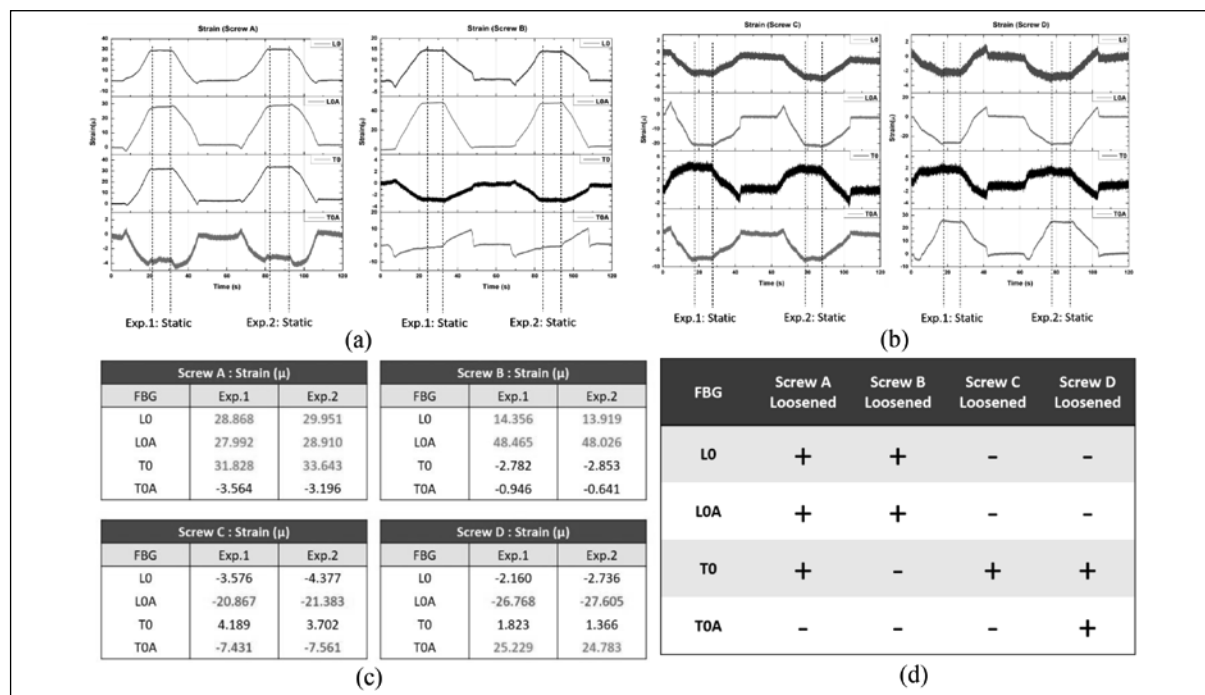
(二) 實驗結果

圖八 (a) 為螺栓 A 與 B 鬆脫再鎖緊過程中應變的變化結果；圖八 (b) 為螺栓 C 與 D 的實驗結果圖，每張結果圖共取在固定端螺栓附近的 4 條 FBG 來作分析，分別是 L0、L0A、T0、T0A，且都是黏貼於固定端表面上的 FBG。

由結果圖顯示不同位置的 FBG 所呈現量測的應變結果有些許不同也分別呈現一些特殊的特性，如 A 螺栓的實驗中，唯獨 T0A 的應變在鬆動螺栓時會先微微上升再下

降使應變呈現微小的負值，且量值僅有 $4 \mu\epsilon$ 的變化，而其他三條 FBG 的應變變化則相近，約為 $30 \mu\epsilon$ ；而當 A 螺栓鎖緊後則應變回復到 0，在第二次鬆脫 A 螺栓及鎖緊過程中的應變變化則與第一次相同。B 螺栓鬆脫的實驗中，T0A 也呈現較特別的變化，在轉鬆的時後應變會先瞬間下降 $8 \mu\epsilon$ 左右，隨時間增加再緩慢上升，而轉緊的時候會先緩慢上升，等到轉緊的那一瞬間，應變值會瞬間驟降約 $10 \mu\epsilon$ ，應變則恢復為零。C 與 D 螺栓的實驗中，都可以發現上述提到的螺栓轉動後造成固定端 4 條 FBG 呈現的特殊應變變化情形。

將螺栓鬆脫並達平衡後的應變取其數值 (圖八 (a)(b) 中的黑色虛線區域)，並把四條 FBG 的值整理成表格，如圖八 (c) 所示，將黑虛線段的應變值平均後列入表中，將此圖表以定性的正負值來呈現，如圖八 (d) 就有明顯的定性結果，不同螺栓鬆脫都有不同的應變正負值特性，因此我們可以根據這 4 條的 FBG 正負值來快速判斷是哪顆螺栓鬆脫，而各螺栓鬆脫的程度，則可由四條光纖的量值來作定量的判定。



圖八 (a)(b) 不同螺栓鬆脫應變變化 (c) 平衡後的應變數值 (d) 將數值以正負號顯示

二、葉片承受敲擊之動態應變及共振頻率實驗

上節主要為準靜態式的施力方式，如：壓力、螺栓鬆緊所造成的應變，而本小節的實驗為使用塑膠敲擊槌進行敲擊葉片表面後所產生的動態應變。實際風力發電機葉片可能遭遇不同物件的撞擊，且光纖光柵又可以埋入於葉片中的複合材料夾層裡隨時進行量測，本節實驗所獲得的風機葉片系統共振頻率可運用在實際風機葉片的檢測或是監測上。

(一) 實驗架設

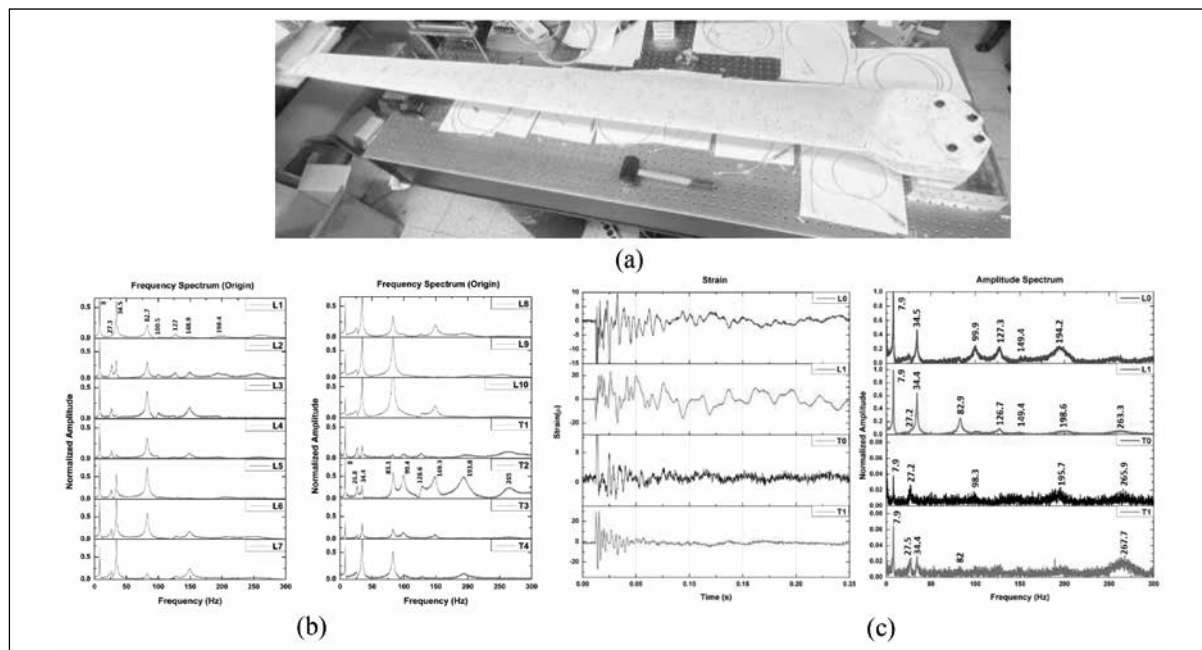
實驗架設如圖九 (a)，進行了不同數量螺栓鬆緊狀況的敲擊實驗，分別為 4 顆螺栓全鎖固、鬆 A 螺栓、鬆 AB 螺栓、鬆 ABC 螺栓。並進行不同葉片表面位置的敲擊，單次實驗量測時間為 15 秒，取樣頻率為 1000 Hz。

(二) 實驗結果

全部螺栓鎖緊並經敲擊後產生的應變時域暫態訊號，而經過快速傅立葉轉換後，即為頻域訊號如圖九 (b)，顯示不同位置的 FBG 所呈現頻域訊號圖的共振頻都很相

近，但有時模態共振頻率並不會被激發，而由圖中顯示 T2 所量測激發出來的共振頻為最多模態，原因可能是距離敲擊點最近的緣故。圖九 (c) 為在固定端 FBG 的訊號分析，左邊是時域訊號而右邊則是轉換成頻域訊號的結果，顯示其動態應變的量值較小，但仍呈現與自由端相近的共振頻率。

將所有自由端 14 條 FBG 所量測出來所有模態的共振頻率詳細定量呈現，前 4 個模態皆能被激發，十四條光纖所得結果並作平均，分別為第一共振頻 8.0 Hz；第二共振頻 26.5 Hz；第三共振頻 34.4 Hz；第四共振頻 82.9 Hz，而較高的共振頻則約有 1/3 無法激發。由結果可以發現，共振頻率會隨著螺栓鬆脫的數量增加而降低，如螺栓全緊的第一共振頻率為 8.0 Hz；A 螺栓鬆脫的第一共振頻率為 7.7 Hz；AB 螺栓鬆脫的第一共振頻率為 7.5 Hz；ABC 螺栓鬆脫的第一共振頻率為 7.0 Hz，因此共振頻率的變化可以用來檢測及監測葉片約有幾顆螺栓鬆脫，此實驗結果特性也將應用於下一小節的螺栓鬆脫判斷方式。



圖九 (a) 敲擊實驗示意圖 (b) 無螺栓鬆脫頻域結果 (c) 固定端 FBG 量測結果

三、風機葉片受風力加載之振動量測及監測

(一) 實驗架設

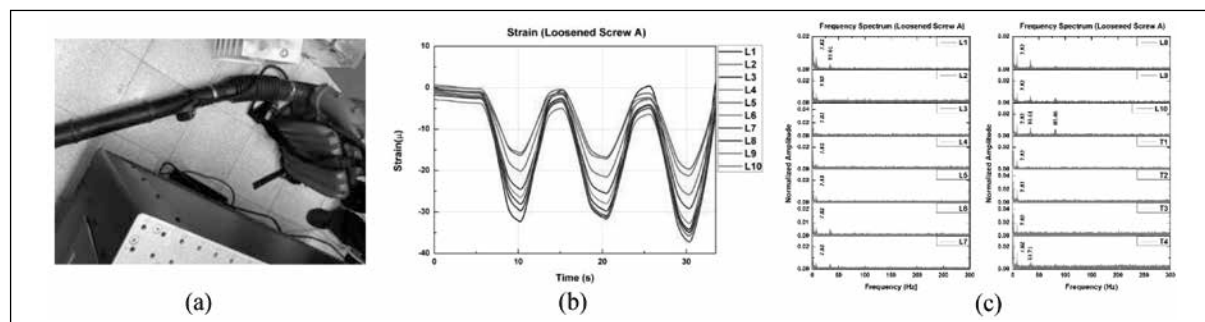
實際運轉的風機葉片會受到自然風的吹動，所以我們亦模擬葉片被風吹動並產生振動的情境。我們使用強力吹葉機 (如圖十(a))，調整吹葉機出風口對準葉片自由端下方處，進行吹葉機強風吹襲葉片 3 次，每次吹襲與休息各佔 5 秒。並分別對螺栓全緊、鬆 A 螺栓、鬆 AB 螺栓、鬆 ABC 螺栓，各別進行吹襲實驗，並由 FBG 量測動態應變。

(二) 實驗結果

呈現各水平 FBG(L1~L10) 的應變時間歷程變化，由於吹葉機由葉片下端吹襲，所以產生葉片上端表面的 FBG 皆為負值 (壓

應變)，由應變的量測結果的量值可與風力的大小作連結，當超過預設值時可啟動停止運轉的措施，保護風機安全。而經 FFT 轉換後之頻域訊號結果，前幾共振頻率為 8.0 Hz、34.5 Hz，這些頻率與前章節所得的結果相同。

圖十 (b) 為一顆螺栓 A 鬆脫後的動態應變結果，圖十 (c) 為其共振頻為 7.8 Hz，顯示其共振頻有下降的趨勢；兩顆螺栓 AB 鬆脫後的為其共振頻為 7.5 Hz，ABC 三顆螺栓鬆脫後的共振頻為 7.0 Hz。可以發現其共振頻亦有下降的趨勢，此螺栓鬆脫後的共振頻與上節所獲得的結果一致，故由風力加載所得的頻率亦可用未監測螺栓鬆脫的狀況，並作為風機維修的準則。



圖十 (a) 強風吹葉機 (b) 時域訊號結果 (c) 頻域訊號結果

結論

布拉格光纖光柵 (FBG) 鋼珠撞擊懸臂薄板的實驗中，其共振頻率在不同量測點與不同撞擊點都是相同的，顯示共振頻率是結構的特性不因量測點與撞擊點不同而改變，但割痕越多或越長則共振頻率會下降越多，經過驗證，共振頻率的變化與割痕多寡成負相關，而共振頻率的變化可直接與缺陷大小及數量作連結，因此可用共振頻率來作複材結構瑕疵的監測。數位影像相關法 (DIC) 可直接偵測缺陷所在位置並作監測，熱負載的結果更可呈現升溫及降溫過程中全場微米級的三維變形精密量測，也顯示 DIC 有能力進行微米級 (μm) 的全場熱變形量測。由熱變形的量測中也呈現本技術可針對結構件受熱所呈現的翹曲現象做定量的精密量測，這項技術也可應用在半導體製程中晶圓及晶片所產生的熱翹曲問題的探討。

而電風扇實驗中，布拉格光纖光柵的量測因取樣頻率較高故可獲得高頻的振動頻率結果也較為複雜，但透過實驗的結果，顯示 FBG 比 DIC 獲得了更多的風扇振動訊息，尤其是風扇

轉動頻率的 2、3 倍頻在頻譜圖中較為明顯突出，還有在頻譜圖中都出現的 115 Hz，推測為馬達轉動的振動頻率，因此證實使用 DIC 及 FBG 兩種方式量測結果都一致。小型風機葉片實驗中，不同螺栓鬆脫黏貼於固定端的 4 條 FBG 會有不同的正負值應變變化，根據這項結果可以用來推斷哪顆螺栓鬆脫，而鬆脫程度可以透過應變變化的量值來推估。而葉片之承受敲擊之動態應變及共振頻率實驗中，顯示不同位置的 FBG 所呈現的頻域訊號圖共振頻率都很相近，而不同螺栓鬆脫數量會影響敲擊後所呈現的共振頻率，螺栓鬆脫數量越多則共振頻率會下降越多。

未來展望

- 一、針對小型風機葉片的螺栓鬆脫問題，進行更深入的探討，可進一步獲得螺栓鬆脫的程度，並撰寫相關軟體可即時顯示結果，這套螺栓鬆脫的即時檢測方法，可使用於許多機械系統的鎖固問題，增加機械結構系統的穩定及安全性，工程應用廣泛。
- 二、DIC 有微米級 (μm) 的全場熱變形量測能力，可應用在半導體製程中晶圓及晶片所產生的熱翹曲問題，提升我國半導體的量測技術並提升產品量率，增加產品的競爭力。

參考文獻

1. 龔瑞清，馬劍清 (2017)。「開發布拉格光纖光柵感測器於多點與即時量測系統並應用在高速內藏式主軸與銑削工件之溫升、變形及轉速之精密量測」，碩士論文，機械工程學研究所，臺灣大學。
2. 廖尉翔，馬劍清 (2022)。「布拉格光纖光柵於固體結構多點動態應變及熱學量測之技術開發及資料解析」，碩士論文，機械工程學研究所，臺灣大學。
3. Puri, J. P. Dear, A. Morris, and F. Jensen(2008), "Analysis of wind turbine material using digital image correlation," in *Proceedings of the XIth International Congress and Exposition, Orlando, FL, USA*, pp. 2-5.
4. R. Wu, D. Zhang, Q. Yu, Y. Jiang, and D. Arola(2019), "Health monitoring of wind turbine blades in operation using three-dimensional digital image correlation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 130, pp. 470-483.

作者簡介

馬鈺棠 / 國立台北科技大學 機械工程系

何昭慶 / 國立台北科技大學 機械工程系 / 指導老師

