# 整合可見光影像與熱影像重建三維熱紋理模型於 橋梁檢測之研究

陳漢霖<sup>1\*</sup> 高書屏<sup>2</sup> 王豐良<sup>3</sup> 林志憲<sup>4</sup>

### 摘要

橋梁具有縮短縣市間距離之重要性,定期之橋梁檢測可以儘早發現劣損,並加以修繕,防止突發性 的斷裂及崩塌等嚴重災情。近年來無人機 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 應用於橋梁檢測發展迅速,其 具備機動性高、時效性高、且可搭載各種儀器使檢測效能提升。本研究中透過無人機搭載數位相機及紅 外線熱像儀拍攝橋梁影像,並設計一套影像處理之流程,將校準處理後之熱影像進行影像三維模型重建 (Image-Based Modeling, IBM),以利於判識內部劣損位置及三維空間之量測。研究中,於目標區域以打音 診斷法獲得實際劣損位置,研究顯示三維模型空間幾何精度達到公厘級別,且於劣損區域之面積測量準 確率優於 96%。

#### 關鍵詞:無人機、熱影像、影像三維模型重建、橋梁檢測

# 1. 前言

橋梁是橫跨河川與縮短縣市間距離的重要建 物,許多老舊的高齡橋梁於臺灣溫暖潮濕、地震頻 繁且颱風逐年侵襲的環境下逐漸劣化。當橋梁構件 劣損並逐漸疲乏老舊至某種程度時,可能造成突發 之崩塌或斷裂,其嚴重危害到交通安全以及人民安 全,因此需定期之檢測,並於發現問題時儘早修繕。 常見之傳統橋梁作業方式為人力現地調查,對於跨 河橋墩或高處之橋梁,則須透過大型橋檢車之升降 平台或其他專業設施以輔助量測,此作業流程耗時、 費力且成本高,對於檢測人員亦存在相當之工作風 險。

相機攝影技術相較於傳統之目視法能客觀的 將構件之劣損資訊呈現於影像中,且其作業流程效 率高且所需之人力成本更低 (Kao *et al.*, 2022)。紅 外線熱像儀可拍攝目標物之輻射強度數值,於影像 後處理中,可以透過標準化 (Normalization) (Dodge et al., 2006) 批量處理多張影像之溫度範圍,使多張 影像之輻射區間對應於一致之灰度範圍 (林宏昱, 2017)。

熱像非破壞性檢測 (Thermographic Nondestructive Testing, TNDT) 能以遠距離操作遠離危險物體,並量測橋梁淺層溫度以辨識出劣損缺陷(高鵬雅,2020),在現今評估中,通常利用水與空氣之特性以突顯物體表面之溫差 (Masri & Rakha,2020)。主動與被動式之熱影像技術已被證明可應用於識別橋梁構件之內部缺陷,例如橋面板之分層(Kurita et al.,2009)。於混凝土結構中,內部之缺陷檢測是基於溫度梯度之熱傳導變化,溫差通常這些熱源來源是藉由外部加熱或是穩定之太陽輻射以提供能量之傳導(Ellenberg et al.,2016)。對於劣損區域以被動式加熱之紅外熱影像判識中,連偉慶(2008)於研究中以手持式紅外線熱像儀對日曬之牆面進行24小時監測,其提出於清晨04:00 至

收到日期:民國 111 年 06 月 30 日 修改日期:民國 111 年 07 月 13 日 接受日期:民國 111 年 08 月 26 日

<sup>1</sup>國立中興大學土木工程學系 碩士生

<sup>2</sup>國立中興大學土木工程學系 教授

<sup>3</sup> 國立中興大學土木工程學系 博士候選人

<sup>4</sup> 國立中興大學土木工程學系 博士生

<sup>\*</sup> 通訊作者, E-mail: hahaoeo123@gmail.com

06:00 以及早上 10:00 至下午 15:00 兩個時段進行熱 影像拍攝,其溫度呈現連續性佳且於空鼓面磚之溫 差值也較穩定。

紋理 (Texture) 是指物體於二維影像之紋路, 於三維表示中與其表面特性及著色方法相關,通 常使用紋理映射 (Texture mapping) 法來模擬物體 的真實紋理,使模型能更真實呈現地物場景 (Hoegner & Stilla, 2016)。 紋理映射結果的一致性, 很大程度上取決於影像間校準之幾何精度,相對位 置以及姿態固定之相機系統有利於影像間協同處 理,然而,熱影像之解析度低、對比度低,且成像 機制中受到環境因素影響產生較多雜訊,因此,透 過特徵點將可見光影像與熱影像匹配較為困難, Dlesk et al. (2021) 透過運動恢復結構 (Structure from Motion, SfM) 進行影像平面變換 (Weber et al., 2015) 以及空間變換方法 (Javadnejad et al., 2020), 其結果增加了點雲與影像間之校準精度。造成紋理 映射之接缝大多是由曝光和光照條件不同造成, Weachter et al. (2014) 結合全局優化 (Lempitsky & Ivanov, 2007) 和基於柏松融合之局部優化,以最大 限度減少接縫的可見性。

基於熱影像生成三維熱紋理模型之相關研究 中, Zheng et al. (2020) 於建築外圍結構熱能檢測研 究中,透過無人機搭載紅外線熱像儀拍攝大範圍之 建築立面,並從影像序列中提取建築立面熱紋理, 此方式能拍攝較高及較廣之範圍,且效率優於人力 執行之方式;產製的三維模型具有溫度及空間訊息, 更真實的反應出目標外觀之熱能分布情況以及空 間三維結構。對於範圍較大的建築物,雖然,熱影 像的三維模型可以快速分析建築熱能的分布,但是, 在 Westfeld et al. (2015) 研究中指出,使用運動回復 結構 (Structure from Motion, SfM) 之技術,將 1,5000 張拍攝大型建築物外牆之熱影像,重建整體 三維熱影像之密點雲幾何場景,其重建之三維熱紋 理模型幾何精度差,在透過密點雲與光達資料對齊 處理後,幾何精度方可達 25 mm。儘管影像數量及 拍攝重疊率高,重建場景之空間解析度,仍然受到 熱影像解析度低及匹配特徵點稀少等因素,而使建

模精度不佳。

Lin et al. (2019) 利用熱影像檢測建築立面熱 能洩漏之研究中,透過可見光相機以運動回復結構 方法重建高精度之三維模型,再透過可見光相機與 紅外線熱像儀之間的方位參數,校正熱點雲之空間 三維位置,最終逐一將可見光影像與熱影像進行特 徵匹配及熱紋理映射,其實驗證明,相較於僅透過 熱影像建模,可以獲得較高之幾何精度。然而,該 方法之建模精度,仍有賴於可見光影像與熱影像間 特徵匹配之效果;建築物因為有門窗等不同材質之 構件,於熱影像中尚能顯示較多之特徵,但是,對 於材質單一之結構體,如橋梁之主梁與橫梁等,則 會因特徵稀少,而影響建模之成果與精度。另對於 三維熱紋理模型之應用中, Zhang et al. (2020)研究 以輻射能量評估地物狀況,並透過重建三維場景以 提取建築物之高程資訊,其判斷區域建築內部結構 與外牆之損傷分布,準確率達78%。

熱影像之分析中,使用物件偵測技術應用於檢 測領域需要對目標之邊緣進行準確之偵測與分割。 有分為傳統透過顯著性及特徵匹配 (Saliency and feature matching approach)方式與深度學習 (Deep learning)方法應用在可見光影像及熱影像之物件 偵測 (張榮鑑,2022)。當研究目標為建物,通常含 有窗戶、管線、玻璃及金屬等不同材質,使溫度差 異明顯,因此,使用顯著性及特徵匹配和深度學習 之相關方法於特徵明顯之拍攝目標,均有良好之成 果 (Wang & Bai, 2019、Zulkifley, 2019);然而,本 研究目標為混凝土橋梁,構件多為同一材質,溫度 變化不明顯,因此橋梁熱影像顏色相近,特徵少, 使可見光及熱影像之特徵匹配困難,另外,單純透 過熱影像亦難以重建三維橋梁模型。

因此,為克服前述問題,本研究提出一套協同 可見光影像與熱影像之校準處理方法,並建立一套 橋梁三維之熱紋理重建方法,可提供視覺化橋梁溫 度及紋理資訊,不僅在 3D 模型中可判識內部劣損 範圍同時亦可計算真實大小,提供橋梁檢測更多的 空間量化資訊。

2. 研究方法

# 2.1 研究流程

研究透過無人飛行載具搭載相機系統執行時 效性高之大範圍橋梁立面拍攝,並設計一套高精度 之熱紋理三維模型流程。流程中,設計位置及姿態 固定並可同步拍攝之相機系統。次之,進行相機之 校準處理及影像對位處理。最後,拍攝目標橋梁並 量測劣損位置,分析三維模型之幾何量測精度,以 及三維熱紋理模型對橋梁劣損辨識之效益,流程如 圖1所示。



# 2.2 相機系統設計及建置

研究中使用解析度為 640 × 512 (pixels) 之 FLIR Vue Pro 紅外線熱像儀,其熱靈敏度約為 0.05℃;可見光相機使用解析度為 4800 × 3200 (pixels) 之SONY RX0數位相機。影像拍攝系統中, 藉由 3D 列印之雲台固定相機系統之外方位參數 (圖 2),並使用單晶片 (single-chip microcomputer) 整合相機、紅外線熱像儀、以及飛行控制器之訊號 於電路晶片之微型計算器,透過實驗設計分別給予 訊號以達到同步拍攝,最終透過 DJI Mavic 2 Pro 無 人機作為相機系統之拍攝雲台 (圖 3)。  
 Sory RX0 敗位相機

 3D列印架座
 FLR Vue pro R 紅外線熱像儀

 圖 2 雙相機系統圖

研究中之影像是藉由無人機搭載相機系統拍 攝獲得,在飛行中相機及紅外線熱像儀拍攝時間差 會造成影像對位處理之姿態及位置偏差。研究設計 拍攝距離設置為 2 m,並拍攝動態目標為 720 degrees/s 之節拍器,以測試相機同步拍攝之穩定性, 並分析無人機於飛行中相機系統同步拍攝之可行 性,如圖 4 所示。



# 2.3 相機率及紅外線熱像儀率 定

對於數位相機以及紅外線熱像儀之影像,透過 非量測型相機之率定方式進行內方位參數率定(鄒 芳瑜,2010),於室外設置長 26 cm、寬 18 cm 之率 定標並透過太陽穩定熱源凸顯邊長為 2 cm 之 96 個 黑白格控制點(高鵬雅,2020)(圖 5),最終透過 matlab calibration進行相機率定,獲得相機之內方 位參數(表 1),將其用於校正影像之透鏡畸變偏



參數	FLIR Vue Pro R	Sony RX0
焦距 $(f_x, f_y)(mm)$	(9.28,9.25)	(9.22,9.22)
像主點 $(X_0, Y_0)(mm)$	(5.37,4.41)	(6.44,4.24)
輻射畸變差(k1,k2)	(-0.354,0.143)	(0.017,0.014)
切線畸變差(p1,p2)	(0.004,-0.005)	(-0.004,-0.008)

本研究中透過相機系統之外方位參數進行影像之坐標校正,以利於後續影像對位之使用。實驗設計中,為凸顯紅外線熱像儀對於目標量測之溫度差異,研究設計長為120 cm、寬為90 cm 之方格鐵網作為率定標,並於實驗前分別校準方格鐵網之直角及間距,確認控制點是否正交且間距一致(圖6),將影像拍攝距離設置為0.8 m使相機之像平面佈滿控制點以提升率定之精度(圖7),最後透過 matlab程式撰寫空間後方交會之方程式,求得相機之相對方位參數(表 2)。





(a) 雷射水準儀校準圖
 (b) 鐵尺校準圖
 圖 6 鐵網控制點校準示意圖



圖 7 外方位率定示意圖

|--|

參數	Sony RX0	FLIR Vue Pro R	$\Delta_{(rgb-ir)}$
Omega (deg)	0.042	-0.691	0.733
Phi (deg)	1.660	0.973	0.687
Kapa (deg)	0.395	0.068	0.327
X (mm)	426.0	379.0	47.0
Y ( <i>mm</i> )	296.7	314.8	-18.1
Z ( <i>mm</i> )	681.6	679.8	1.8

註: deg=degree

### 2.4 影像處理

FLIR Vue Pro R 紅外線熱像儀之熱靈敏度達 ±0.05°C,溫度之範圍選取可以凸顯熱影像中之目 標輪廓。研究中透過選取橋梁劣損處之輻射數據, 分析不同輻射強度間之虛擬色彩呈現,最終透過標 準化公式將全局熱影像輻射強度範圍限縮至一致 之灰度,如公式(1)所示。

虛擬色彩使用 traditional pm3d 調色盤顏色之關 係式,如公式(2)、(3)、(4)、(5),其顏色以黑、藍、 紅、黃之漸層變化呈現溫度由低至高溫趨勢(圖 8)。

研究中之標準化公式及虛擬色彩公式皆以 python 語言撰寫,並於 FLIR tools 軟體判識目標輻 射範圍後設置一範圍之溫度區間,將溫度區間統整 於 0 至 255 之灰度區間,最終將標準化之數據以虛 擬色彩進行顏色呈現(圖 9)。



圖 8 traditional pm3d 虛擬色彩圖



圖 9 熱影像虛擬色彩呈現圖

 $x' = a + \frac{(x - T_{min}) \cdot (b - a)}{T_{max} - T_{min}}....(1)$ 

式中,x'為標準化後的灰階值;x是像素的溫度值; b與a分別是標準化後重新縮放到影像素值的區間,研究中將其設置為255與0;T<sub>max</sub>是溫度選取範圍之最高溫值;T<sub>min</sub>是溫度選取範圍之最低溫 值。

 $\mathbf{R} = np.round(np.sqrt(x'))....(2)$ 

$$G = np.round(np.power(x', 3))....(3)$$

B' = np.round((np.sin(2 \* pi \* x')))....(4)

B = np.maximum(B', 0)....(5)

式中, R、G、B 分別為影像三原色; x'為輻射強度 值。

### 2.5 影像對位

此研究目的是使「高解析度可見光影像」及「低 解析度之熱影像」校正於相同坐標系,使用前者重 建三維模型,再將精準對位後之熱影像映射至三維 模型。

研究中透過相機率定之內方位參數以 Abdel-Aziz & Karara (2015)之透鏡補償函數公式 (6)、(7)、(8)、(9)校正相機影像之畸變差,並藉由 相機外方位率定之相對姿態參數 (Omega, Phi, Kappa)對熱影像像主點 (*x*<sub>0</sub>, *y*<sub>0</sub>)透過旋轉矩陣公 式(10)進行姿態改正,最終以 Opencv 之平面透視 投影方式 - cv2.warpPerspective 使熱影像平面與可 見光影像平面姿態一致。

然而可見光影像與熱影像間解析度差異導致 無法對位,其中前者之感光元件像素大小為 2.75 µm;後者之感光元件像素大小為17.00 µm。 研究透過 OpenCV 基於 4×4 像素鄰域之三次插值法 方法 – cv.INTER\_CUBIC 對熱影像以像素之倍率 關係進行上取樣 (圖 10),使兩相機拍攝之影像具有 相同像距,最終透過裁切去除影像中未交集之像幅 邊緣,以達成相同像幅大小之影像對位,如圖 11 所示。



(6)
(6

$$\Delta y_r = y'(k_1 r^2 + k_2 r^4)....(7)$$

$$\Delta x_t = p_1(r^2 + 2x'^2) + 2p_2 x' y' \dots (8)$$

$$\Delta y_t = p_2(r^2 + 2y'^2) + 2p_1 x' y' \dots (9)$$

式中,

0

0

$$x' = x - x_0; y' = y - y_0$$
  
 $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$   
 $x \cdot y: 像片坐標; x_0 \cdot y_0: 像主點$   
 $k_1 \cdot k_2: 輻射畸變差參數$   
 $p_1 \cdot p_2: 正切畸變差參數$ 

 $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{\kappa} \mathbf{M}_{\phi} \mathbf{M}_{\omega} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 

式中, $M_{\kappa}$ 是影像 Z 軸之旋轉矩陣; $M_{\phi}$ 是影像 Y 軸
之旋轉矩陣; $M_{\omega}$ 是影像 X 軸之旋轉矩陣; $M$ 是三
維之旋轉矩陣,是三個軸之旋轉序列複合。

 $1 | | \sin \phi = 0 \cos \phi | |_0$ 

cosω

 $-\sin\omega$ 

.....(10)

sin w

cos ω.

#### 2.6 影像對位之室內測試

由於相機焦距相異,且紅外線熱像儀之焦距中 f<sub>x</sub> > f<sub>y</sub>,因此影像對位準確度是建立在拍攝距離與 初始拍攝距離相同之條件下,為此設計不同距離之 影像對位測試,分析隨著拍攝距離改變於對位偏之 變量。

室內測試首先以雷射測距儀粗略擺設相機攝 影距離 (圖12) 分別為1.5、2.0和2.5*m*,藉由SONY RX0 內方位參數焦距 *f* = 9.221(*mm*),且已知可見 光影像像素大小為 2.75  $\mu m$ ,將焦距除以像素大小 即可求得 f = 3353.4 (pixels)。鐵尺量測之單格方 形鐵網寬度 S = 50 (mm),三段拍攝距離之 (圖 13) 成像中單一方格鐵網像距距離  $l_1 = 115$ (pixels)、  $l_2 = 86$ (pixels)、 $l_3 = 68$ (pixels)。



圖 12 雷射測距儀設置拍攝距離圖



(a)拍攝距離 1.5m (b)拍攝距離 2.0m (c)拍攝距離 2.5m 圖 13 不同距離之對位影像圖

為瞭解拍攝距離與初始距離不同時對影像對 位偏差之影響,本研究嘗試以三段距離進行實驗, 並使用公式(11)之關係式 (圖 14),計算出實際拍攝 距離分別為  $D_1 = 1458(mm) \cdot D_2 = 1949(mm) \cdot$  $D_3 = 2466(mm) \circ 於後續中分以 <math>D_1 \oslash D_3$  設為初始 距離,分析拍攝距離與初始距離增加或減少,所造 成的對位偏差量。



 $\frac{f}{p} = \frac{l}{s}....(11)$ 

式中, *f* 為相機之焦距 (*pixels*); *S* 為目標影像拍 攝之物距 (*mm*); *l* 為目標影像拍攝後成像之像距 (*pixels*); *D* 為影像拍攝時之距離 (*mm*)。

為了明確比較對位偏差量,分別於可見光與熱 影像中相同特徵位置繪製藍色及紅色方框 (圖 15), 結果中 (表 3),對位偏差會隨著拍攝距離增加而變 大,當距離偏差0.5 m時,位置最大偏差量為18 mm; 當距離偏差至1.0 m時,位置最大偏移量為38 mm, 因此於實際橋梁拍攝時,攝距與初始距離維持一致, 可減少對位偏差之影響。



圖 15 影像之對位偏差示意圖 表 3 拍攝距離與對位偏移關係表

基準位置		D	1		<i>D</i> <sub>3</sub>		
改變	整距離(m)	0.5	1.0	-0.5	-1.0		
Λ1	$\Delta x (pix)$	-31	-52	28	52		
$\Delta \iota$	$\Delta y (pix)$	-1	-4	2	3		
٨с	$\Delta X (mm)$	-18	-38	16	23		
Δ3	$\Delta Y(mm)$	-1	-3	1	1		

註:拍攝距離之增加為正減少為負;pix=pixel;  $\Delta l$ 為像平面偏移量; $\Delta S$ 為物距偏移量。

#### 2.7 重建橋梁三維熱紋理模型

拍攝之目標為中投公路 8K 橋下之橋墩帽梁 (圖 16)。拍攝時間為 2022 年 5 月 24 日,上午 11:30 至中午 12:00,環境溫度為 34℃、相對濕度為 60%。

無人機飛行之拍攝距離與混凝土橋面保持在 1.5 m 至 2.5 m 之間,拍攝中以懸停姿態模式觸發快 門,以提升影像之重疊率,並將影像校準且精準對 位之影像重建三維熱紋理模型。

本研究使用運動回復結構技術進行橋梁三維 熱紋理模型重建,其步驟分為4項;首先是以可見 光影像進行特徵萃取及匹配,使用尺度不變特徵變 換 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT) 匹配可 見光影像間之特徵點,對齊多幅影像之位置;其次 為光束法平差 (Bundle adjustment), 當兩張或多張 之可見光影像中,有多個相同匹配之位置時,透過 數學方法優化點位之估算,計算出最佳之影像位置, 此方法可計算拍攝時之相機參數(包含相機之三維 空間位置、姿態、焦距)及特徵對應之位置;再者 為多視圖立體匹配 (Multiview stereo matching, MVS)方法,將不同視點拍攝之影像,回復至真實 之地物場景,以重建拍攝場景,在計算中,使用前 述之相機參數及優化之點位作為控制點,以計算密 集點雲及三維表面,由於所有之像素皆被使用,因 此,重建之密集點雲模型(如圖17)分辨率與原始 影像相似 (Nissen, 2016);最後為紋理模型生成,將 二維可見光影像紋理資訊對應到三維空間位置,即

是三維表面某一著色點與二維可見光影像紋理位 置匹配,即可得到高精度之三維可見光紋理模型。

本研究在上述最後步驟中,將建模中使用之可 見光影像數據集,替換為精準對位後之熱影像數據 集,並重新進行三維的熱紋理映射,即可得到高幾 何精度的橋梁三維熱紋理模型 (如圖 18)。其使用之 紋理映射模式有兩種,一為平均色彩權重法,使用 單張影像中所有像素的加權平均值進行映射計算; 二為馬賽克法,是將影像劃分為多個獨立頻率域, 並將影像高頻域之分量沿著接縫線混合,愈遠離接 縫線之低頻域紋理混合程度越少 (Agisoft LLC, 2019)。



圖 16 中投公路 8K 高架橋圖



#### 2.8 劣損區域量測

研究中之混凝土橋牆面背景有許多污漬雜訊, 以目視辨識劣化區域較為困難,因此藉由打音診斷 法驗證內部之劣損範圍(圖19),並使用全測站量測 坐標(圖20),本研究中將其視為量測真值。重建三 維熱紋理模型後,將橋面量測之控制點作為三維模 型之比例尺(圖20),使模型與實際空間之比例關係 一致。後續於三維熱紋理模型中判識劣損特徵位置 並以手動方式標註位置,分析相較於實際量測之空 間位置、距離以及面積,探討三維熱紋理模型於混 凝土橋梁劣損檢測之效益。

本研究設計,先以熱像儀拍攝整個橋梁實驗區 域之熱影像,並進行橋梁三維熱紋理模型重建,再 於熱紋理的區域進行打音診斷法驗證。



圖 19 以打音診斷法判識劣損區域圖



圖 20 全測站量測劣損位置圖



 (a)劣損A區之熱影像
 (b)劣損B區之熱影像

 圖 21 劣損處熱影像示意圖

# 3. 結果與討論

# 3.1 相機系統同步拍攝測試結果

研究中設置拍攝之動態目標角速度為 720 degree/s 之節拍器 (圖 22),再透過影像對位步驟測 試同步拍攝影像之穩定性。測試結果中,拍攝 10 張角速度為 720 degrees/s 之對位成功率為 70%,其 中未成功對位之最大誤差約為24.6°(圖 23),相當於 0.03 秒差。測試中在快速的動態拍攝時,可滿足本 實驗中無人飛行載具以低速且懸停姿態模式拍攝 影像之需求。於實驗拍攝中亦發現紅外線熱像儀有 毫秒之不穩定拍攝誤差,而數位相機快門拍攝穩定 性相對較高出許多。



圖 23 同步拍攝之最大時間差圖

# 3.2 目標橋梁影像對位分析

可見光與熱影像之明顯特徵點標記後,藉由標 記點進行初步對位之基準,其中藍色標記為可見光 特徵位置 (圖 24(a)),紅色標記為熱影像特徵位置 (圖 24(b))。研究拍攝目標橋梁之重點劣損處,因此 於雙影像中提取相同劣損之特徵位置進行標記動 作,並分析Δx及Δy之偏差量後加以改正,如圖 25 及圖 26 所示。



(a) 可見光影像特徵(b) 熱影像特徵圖圖 24 對位之基準影像圖





圖 25 劣損位置 A 對位示意圖



圖 26 劣損位置 B 對位示意圖

影像對位分析中,劣損位置 A 之影像對位差  $\Delta x = 4 (pixels); \Delta y = 2 (pixels); 劣損位置 B 之$  $影 像 對 位 差 <math>\Delta x = -26 (pixels); \Delta y = \cong$ -4 (pixels)。於室內測試結果分析中,當拍攝距離增加或減少在 0.5 m 時,對位最大之偏移量約為 31<math>(pixels)。室外飛行拍攝之結果之對位偏移量中,劣損處最大偏移量為 26 (pixels),結果可大略推測出飛行之距離落在初始拍攝位置(2 m)之前後 0.5 m內。

### 3.3 熱影像標準化分析

拍攝之熱影像以 FLIR tools 軟體開啟,並使用 溫度量測工具,將明顯溫差之區域視為劣損區域, 並分析其輻射強度範圍,如圖 27 所示,並設置影 像標準化之輻射強度範圍加以突顯劣損處之輪 廓。



圖 27 劣損區域溫度分析示意圖

紅外熱像儀之熱靈敏度可達±0.05℃,溫度範 圍限縮愈小,可以強化劣損區之溫度差異,但也會 因為拍攝時距離及角度的些微不同,顯示影像間輻 射不一致 (圖 28),使後續之三維紋理映射產生接縫 雜訊。

研究中先分析劣損處之平均輻射強度為8305, 將其設置為中間值,並逐漸增加輻射區間,當輻射 範圍介於±155時,顯示之影像能有效凸顯出劣損位 置並減少影像間輻射不一致之影響,最終之影像輻 射強度範圍設置於8150與8460間(圖29)。





圖 29 輻射範圍於 8150 至 8460 虛擬色彩圖

### 3.4 三維熱紋理映射結果分析

由於相機系統拍攝之距離及傾角隨著無人機 飛行而有些許變動,紅外熱像儀對於相同目標物偵 測之輻射值也隨之改變,影像間輻射不一致使三維 模型之紋理產生接縫。 在平均色彩權重之紋理映射方法中,可以明顯 看出紋理接縫,如圖 30(a) 及圖 31(a);由於影像中 高頻率域通常是影像中之雜訊或示訊號變化劇烈 處,而低頻率域則是變化頻繁之影像輪廓或是背景, 在馬賽克紋理映射方式中,其混合影像間高頻率域 之不一致性接縫,並保留低頻率域之影像輪廓紋理。 熱紋理映射結果中,可以發現影像間之接縫被混合, 亦保留劣損區域之邊緣特徵,有利於劣損區域量測, 如圖 30(b) 及圖 31(b) 所示。



(b) 馬賽克映射紋理 圖 30 劣損 A 處色彩平均權重熱紋理映射圖





(a) 平均權重映射(b) 馬賽克映射圖 31 劣損區域 B 之熱紋理映射圖

## 3.5 劣損區域量測

本研究透過打音診斷法判斷出真實之劣損範 圍,並於劣損邊界轉折處之污漬等特徵作為記錄點。 實際量測出範圍之位置及大小,後續再與重建之三 維熱紋理模型量測劣損範圍作進行比較。

重建三維熱紋理模型後,續以全測站量測模型 真實比例,將三維模型轉換至真實大小,因此,於 模型上量測之範圍即為真實之大小。最後於三維重 建之熱紋理模型中以輔助人員於模型中識別整體 橋梁之劣損範圍,進行坐標之標註(表4),再與全 測站量測之坐標進行比較兩者間之位置、邊長與面 積差異,如圖32及圖33所示。



圖 32 三維熱紋理模型劣損 A 處標註圖

表 4 劣損位置表								
百禄 野谷		售	實際量測位置			三維模型量測位置		
吧哦	新ロロム	X ( <i>m</i> )	Y ( <i>m</i> )	Z ( <i>m</i> )		X ( <i>m</i> )	Y ( <i>m</i> )	Z ( <i>m</i> )
	01	-0.583	-11.845	2.619		9.416	0.190	-3.777
	02	-0.805	-11.821	2.608		9.638	0.182	-3.781
	03	-1.079	-11.804	2.614		9.909	0.195	-3.787
	04	-1.370	-11.785	2.629		10.200	0.210	-3.788
	05	-1.520	-11.772	2.629		10.353	0.207	-3.791
А	06	-1.639	-11.777	2.588		10.472	0.164	-3.806
	07	-1.382	-11.777	2.531		10.218	0.110	-3.792
	08	-1.241	-11.792	2.525		10.075	0.107	-3.789
	09	-1.083	-11.804	2.496		9.924	0.077	-3.790
	10	-0.613	-11.840	2.497		9.452	0.071	-3.780
	11	-0.362	-11.861	2.532		9.199	0.100	-3.778
	12	-7.465	-11.276	3.621		16.368	1.115	-3.861
	13	-7.386	-11.284	3.465		16.233	1.011	-3.867
В	14	-7.498	-11.274	3.484		16.226	1.125	-3.864
	15	-7.634	-11.262	3.508		16.218	1.265	-3.860
	16	-7.541	-11.270	3.570		16.300	1.182	-3.860



圖 33 三維熱紋理模型劣損 B 處標註圖

線段距離分析結果中,透過距離公式 (12)量 測點與點間距離,當中 $\overline{D_{01}D_{02}}$ 即為點位 01 及 02 連線之距離。在 26 個線段中之測量距離標準差為 ±3.06 mm ,當中僅一線段  $\overline{D_{08}D_{09}}$ 之量測誤差為 6.3 mm 落在兩倍標準差之外,量測 結果顯示模型空間幾何精度有達到公厘級別,結果 如表 5 所示。

式中, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分別為位置坐標間之差量。

面積測量之分析中,以海龍公式(13)計算由劣 損位置 26 組線段構成之面積,其中 12 個劣損面積 之量測僅個位數平方公分 (*cm*<sup>2</sup>)之判識誤差,且辨 識準確率皆優於 96%,結果如表 6。

 $A = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$ (13)

式 中 , *a*,*b*,*c*分別為三角形之邊長; s = (*a*+*b*+*c*)/2。

研究之結果顯示,以近距離拍攝橋梁立面之三 維熱紋理模型之影像辨識中,可以獲得精確之劣損 位置辨識力,相較於實地以打音診斷法逐一確認出 劣損位置,再透過全測站量測之判識範圍更廣且效 率更佳。

# 4. 結論與建議

本研究中,藉由 Mavic 2 Pro 無人機作為拍攝系 統之雲台,搭載 FLIR Vue Pro R 紅外線熱像儀以及 SONY RX0 數位相機,達到快速之大範圍橋梁立面 拍攝並辨識出劣化區域之目的。影像後處理中,本 研究提出一套熱紋理之三維模型重建流程,於空間 中視覺化影像之紋理以及溫度資訊,以檢視出肉眼 看不見之內部劣損,並提供檢測方面更多的量化資 訊,使橋梁劣損判識之作業更全面且更有效率。

其主要影響對位因素為飛行時之距離偏差,其差異 量可於對影像處理中檢視並加以改正提升對位精

度。三維紋理映射方法中,研究使用 Agisoft Metashape 軟體之馬賽克紋理映射方法,其融合了 熱影像間輻射不一致之接縫,並保留劣損處之特徵 輪廓,有利於劣損位置的判識及量測。研究於劣損 區域以打音診斷法量測實際劣損位置,並比較三維 影像對位結果中,對於拍攝平面之混凝土橋梁, 模型之位置誤差。研究結果顯示, 三維熱紋理模型 之 26 個線段測量之標準差為 ±3.06 mm,其中僅一

表 5 線段距離量測表					
區域	線段	實際距離(mm)	量測距離(mm)	距離誤差(mm)	標準差(mm)
	$D_{01}D_{02}$	223.6	222.3	1.3	
	$D_{01}D_{10}$	125.7	124.8	1.0	
	$D_{01}D_{11}$	238.0	235.8	2.2	
	$D_{02}D_{03}$	274.6	271.5	3.1	
	$D_{02}D_{09}$	300.2	304.2	-4.0	
	$D_{02}D_{10}$	222.6	216.7	5.9	
	$D_{03}D_{04}$	292.0	290.5	1.5	
	$D_{03}D_{08}$	185.2	188.0	-2.7	
	$D_{03}D_{09}$	118.1	119.4	-1.3	
А	$D_{04}D_{05}$	150.6	153.3	-2.7	
	$D_{04}D_{07}$	99.1	101.9	-2.8	
	$\overline{D_{04}D_{08}}$	165.8	161.6	4.2	
	$D_{05}D_{06}$	126.0	127.7	-1.8	±2 06
	$D_{05}D_{07}$	169.3	166.3	3.1	<u> </u>
	$D_{06}D_{07}$	263.2	260.7	2.6	
	$D_{07}D_{08}$	141.9	142.4	-0.4	
	$D_{08}D_{09}$	161.1	154.6	6.5	
	$D_{09}D_{10}$	471.4	471.7	-0.3	
	$D_{10}D_{11}$	254.3	255.2	-0.9	
	$D_{12}D_{13}$	175.0	171.1	3.9	
	$D_{12}D_{14}$	140.5	142.5	-2.0	
	$D_{13}D_{14}$	113.7	114.6	-0.9	
В	$D_{14}D_{15}$	139.0	140.1	-1.1	
	$\overline{D_{14}D_{16}}$	96.3	94.1	2.1	
	$D_{15}D_{16}$	112.1	116.7	-4.6	
	$D_{1}$	91.7	95.5	-3.8	

表 6 劣指面積量測表

區域	面積	實際面積(cm <sup>2</sup> )	量測面積(cm <sup>2</sup> )	面積誤差(cm <sup>2</sup> )	準確率(%)
	A <sub>01</sub>	148.4	146.3	2.0	98.6
	A <sub>02</sub>	134.6	131.2	3.4	97.5
	A <sub>03</sub>	262.8	256.1	6.6	97.5
	A <sub>04</sub>	162.1	161.7	0.4	99.7
А	A <sub>05</sub>	94.1	92.0	2.0	97.8
	A <sub>06</sub>	142.0	140.6	1.3	99.1
	A <sub>07</sub>	70.0	71.6	-1.6	97.7
	A <sub>08</sub>	74.0	76.5	-2.5	96.6
	A <sub>09</sub>	86.8	87.6	-0.8	99.1
D	A <sub>10</sub>	70.7	89.1	-1.4	97.9
D	A <sub>11</sub>	88.2	108.9	-1.7	98.0

A <sub>12</sub>	72.4	162.0	-2.6	96.4
-----------------	------	-------	------	------

線段D<sub>08</sub>D<sub>09</sub>之誤差為 6.5mm 超出兩倍之標準差, 顯示三維模型幾何精度達到公厘級別;至於劣損區 域之 12 個面積中,測量誤差亦達到平方公分 (cm<sup>2</sup>) 級別,辨識劣損面積之準確率優於 96%。

未來之研究可使用機架底板較大之自組無人 飛行載具,使配置之儀器重量設置於中心位置,以 增加飛行之穩定性,亦能提升飛行之拍攝效率。其 次,可於拍攝系統加裝雷射測距系統,達到即時分 析拍攝距離,使飛行距離與牆面維持一定距離,增 加影像對位精度。本研究提出之三維熱紋理模型, 除了用於檢測混凝土橋梁,亦可應用於其他領域, 例如建築能源評估,若拍攝目標為不同材質之表面, 則需考量到反射率參數調整,並率定紅外線熱輻 射。

### 致謝

本研究感謝國科會計畫編號: MOST 109-2622-E-005-004 -CC3 及自強工程顧問有限公 司之經費支持。

# 參考文獻

- 林宏昱,2017。整合紅外線熱影像與可見光影像之 熱影像三維模型重建,國立中興大學土木工程 學系碩士學位論文。[Lin, H.Y., 2017. Integration of infrared thermal image and visible image for 3D thermal model reconstruction, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 高鵬雅,2020。無人機搭載紅外線熱像儀於混凝土 橋梁檢測,國立中興大學土木工程學系碩士學 位論文。[Kao, P.Y., 2020. UAV with infrared thermal imager for concrete bridge inspection, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 張榮鑑,2022。基於擴張空間感知編碼器之異質雙 影像語意切割網路設計與 FPGA 晶片實現,國 立雲林科技大學電子工程系碩士學位論文。

[Chang, J.C., 2022., Heterogeneous image sementation network architecture design and FPGA implementation based on dilated spatial encoder, Master Thesis, National Yunlin University of Science & Technology, Taiwan, ROC. (in Chinese)]

- 連偉慶,2008。非破壞檢測技術於建築物缺陷檢測
   之應用研究,國立成功大學土木工程學系碩士
   學 位 論 文 。 [Lien, W.C., 2008. Applying non-destructive testing to inspecting the building defects, Master Thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 鄒芳諭,2010。以非量測性相機進行近景攝影測量 探討,國立交通大學土木工程學系碩士學位論 文。[Tsou, F.Y., 2010. Analysis of close-range photogrammetry by using non-metric camera, Master Thesis, National Chiao Tung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- Abdel-Aziz, Y.I., and Karara, H.M., 2015. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2(5): 103-107. 【修改因 1971 年作者一人,2015 年為期刊, 擇一,改 2015 年】
- Agisoft LLC, 2019. Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.5. 【修改因 Ver 1.71 為 2021 年】
- Dlesk, A., Vach, K., and Pavelka K., 2021. Transformations in the photogrammetric co-processing of thermal infrared images and RGB images, Sensors, 21(15): 5061.
- Dodge, Y., Cox, D., and Commenges, D., 2006. The Oxford Dictionary of Statistical Terms, Oxford University Press on Demand.
- Ellenberg, A., Kontsos, A., Moon, F., and Bartoli, I., 2016. Bridge deck delamination identification

from unmanned aerial vehicle infrared imagery, Automation in Construction, 72: 155-165.

- Hoegner, L., and Stilla, U., 2016. Automatic 3D reconstruction and texture extraction for 3D building models from thermal infrared image sequences, Proceedings of the 13th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT 2016), Gdańsk, Poland, pp.322-331.
- Javadnejad, F., Gillins, D.T., Parrish, C.E., and Slocum, R.K., 2020. A photogrammetric approach to fusing natural colour and thermal infrared UAS imagery in 3D point cloud generation, International Journal of Remote Sensing, 41: 211-237.
- Kao, S.P., Wang, F.L., Lin J.S, Tsai, J., Chu, Y.D., and Hung, P.S., 2022. Bridge crack inspection efficiency of an unmanned aerial vehicle system with a laser ranging module, Sensors, 22(12): 4469.
- Kurita, K., Oyado, M., Tanaka, H., and Tottori, S., 2009. Active infrared thermographic inspection technique for elevated concrete structures using remote heating system, Infrared Physics & Technology, 52(5): 208-213.
- Lempitsky, V., and Ivanov, D., 2007. Seamless mosaicing of image-based texture maps, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'07), Minneapolis, MN, USA.
- Lin, D., Jarzabek-Rychard, M., Tong, X., and Maas, H.G., 2019. Fusion of thermal imagery with point clouds for building facade thermal attribute mapping, ISPR Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 151: 162-175.
- Masri, Y.E., and Rakha, T., 2020. Review of non-destructive techniques (NDTs) for building diagnostic inspections, Proceedings of the 2020 Building Performance Analysis Conference and

SimBuild, pp.201-213.

- Nissen, E., 2016. Structure-from-Motion, Available at: https://cloud.sdsc.edu/v1/AUTH\_opentopograph y/www/shortcourses/16UNAVCO/nissen-OpenT opo-ASU-APR-2016-structure-from-motion.pdf, Accessed June 1, 2022.
- Waechter, M., Moehrle, N., and Goesele, M., 2014. Let there be color! Large-scale texturing of 3D reconstructions, Proceedings of the Computer Vision–ECCV, Springer, Cham, Switzerland, pp. 836-850.
- Wang, P., and Bai, X., 2019. Thermal infrared pedestrian segmentation based on conditional GAN, IEEE Transactions on Image Processing, 28(12): 6007-6021.
- Weber, I., Jenal, A., Kneer, C., and Bongartz, J., 2015. PANTIR - A dual camera setup for precise georeferencing and mosaicing of thermal aerial images, Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3/W2 Joint ISPRS Conference, Munich, Germany, pp. 269– 272.
- Westfeld, P., Mader, D., and Mass, H.G., 2015. Generation of TIR-attributed 3D point clouds from UAV-based thermal imagery, Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 5: 381-393.
- Zhang, R., Li, H., Duan, K., You, S., Liu, K., Wang, F., and Hu, Y., 2020. Automatic detection of earthquake-damaged buildings by integrating UAV oblique photography and infrared thermal imaging, Remote Sensing, 12(16): 2621.
- Zheng, H., Zhong, X., Yan, J., Zhao, L., and Wang X., 2020. A thermal performance detection method for building envelope based on 3D model generated by UAV thermal imagery, Energies, 13(24): 6677.

Zulkifley, M.A., 2019. Two streams multiple-model

object tracker for thermal infrared video, IEEE Access, 7: 32383-32392.

### **Research on Integrating Visible Image and Thermal Image to Reconstruct 3D Thermal Texture Model for Bridge Inspection**

Han-Lin Chen<sup>1\*</sup> Szu-Pyng Kao<sup>2</sup> Feng-Liang Wang<sup>3</sup> Jhih-Sian Lin<sup>4</sup>

# Abstract

Bridges have the importance of shortening the distance between counties and cities. Regular bridge inspections can detect bad damage as soon as possible, and repair them to prevent serious disasters such as sudden ruptures and collapses. In recent years, the application of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in bridge inspection has developed rapidly. It has high mobility, high timeliness, and can be equipped with various instruments to improve the inspection efficiency. In this study, the bridge image was captured by a drone equipped with a camera system, and a set of image processing procedures were designed to reconstruct a 3D thermal texture model from the calibrated image, so as to facilitate the identification of the bad damage location and the measurement of the 3D space. In the research, the actual location of the defect was obtained by the impact acoustic method in the target area. The results showed that the spatial geometric accuracy of the 3D model reached the millimeter level, and the measurement accuracy of the surface of the inferior area was better than 96%.

Keywords: UAV, Thermal Image, Image-Based Modeling, Bridge Inspection

<sup>2</sup> Professor, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University

<sup>3</sup> Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University
 <sup>4</sup> Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Master Student, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University

<sup>\*</sup> Corresponding Author, E-mail: hahaoeo123@gmail.com