

ISSN:1812-2868

臺灣公路工程

第 47 卷 第 3 期

〈每月 15 日出刊〉



TAIWAN HIGHWAY ENGINEERING

Vol. 47 No.3 Mar. 2021

交通部公路總局

中華民國 110 年 3 月 15 日



封 面 說 明

台14甲33K-石門山

林鴻源 提供



臺灣公路工程

TAIWAN HIGHWAY ENGINEERING

中華民國 41 年 11 月 11 日創刊

第 47 卷 第 3 期 目錄

本刊為中華民國 41 年 11 月 11 日創刊，至 63 年 3 月 1 日發行第 22 卷第 5 期，經合併本局發行之臺灣公路工程、養路及公路機料等三種月刊，仍以臺灣公路工程為名，於 63 年 7 月 15 日起重訂為第 1 卷第 1 期繼續發行

臺灣公路工程

發行人

許 鈺 漳

社長

林 聰 利

總編輯

陳 敬 明

總幹事

李 崇 堂

編輯

鄧文廣 陳進發

李忠璋 黃三哲

蔡宗成 劉雅玲

葉双福 陳松堂

薛讚添 陳營富

劉世桐 吳昭煌

李順成 謝哲雄

詹益祥 江金璋

邵厚潔 顏召宜

實務報導

非接觸式量測及 AI 自動偵測裂縫於橋梁檢測之應用

.....劉世桐、陳毅銘、李坤哲、黃志杰、陳國睿... (2)

公路防災預警機制—智慧防災

.....李順成、林文雄、陳國正、張立群... (44)

非接觸式量測及 AI 自動偵測裂縫於橋梁檢測之應用

劉世桐¹、陳毅銘²、李坤哲³、黃志杰⁴、陳國睿⁵

摘要

臺灣地區南北狹長，山地及丘陵地占全島面積三分之二以上，溪流橫越山谷及平原切割地形，因此橋梁為臺灣地區非常重要的交通設施之一。由於臺灣橋梁逐漸面臨高齡化問題，需透過橋梁檢測及時發現橋梁結構損傷劣化，進而規劃適當之維修補強計畫，延長橋梁生命週期。現行臺灣橋梁定期檢測以直接目視檢測為主，傳統裂縫量測需由檢測人員將裂縫尺貼於裂縫上始可量測，雖裂縫尺最小精度達0.05mm，透過人眼判釋卻仍伴隨相當誤差。近年來科技發展迅速，可嘗試將人工智慧導入橋梁檢測作業，透過電腦進行裂縫非接觸式量測，量測精度既優於傳統裂縫尺，又可降低人為誤判之可能，進而改善橋檢人員作業難度。本文利用非接觸式檢測技術及電腦AI深度學習，於橋梁現地進行場域驗證，探討橋梁檢測結合時下先進技術之成效，供公路管理單位作為未來智慧橋檢之基礎。

關鍵字：智慧橋檢、非接觸式量測、人工智慧、深度學習、無人機(UAV)

壹、前言

交通部於民國 107 年 10 月頒布之「公路橋梁檢測及補強規範」將「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」及「公路鋼筋混凝土結構橋梁之檢測及補強規範」合併為單一規範，其內容針對橋梁構件劣化之裂縫情形評等方式由「定量化描述」改採「定性化描述」，惟橋檢人員於現地檢測時若遇不易靠近檢測之橋梁構件，仍無法藉由輔助工具得知實際劣化範圍，日後亦無法針對劣化構件進行歷程追蹤。為改善此困境，公路總局於「108 年度公路總局第二區養護工程處省道跨河橋梁目視 DERU 檢測評估工作」乙案中開發

¹ 交通部公路總局第二區養護工程處 處長

² 交通部公路總局第二區養護工程處 工程司

³ 黎明工程顧問股份有限公司結構部 協理

⁴ 黎明工程顧問股份有限公司結構部檢測組 主任

⁵ 財團法人工業技術研究院 技術副理

非接觸式量測技術，將高解析度攝影機結合測距感測器同時擷取劣化影像及深度資訊，藉由手機 APP 連線遠端遙控拍攝，可於現場即時量測劣化範圍。此外，亦透過電腦 AI 深度學習技術，由電腦自動偵測劣化區域，進而達到智慧橋檢之目的。

貳、橋梁目視檢測規範及橋梁管理系統

交通部於民國 107 年頒布之「公路橋梁檢測及補強規範」以「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範，民國 97 年」、「公路混凝土結構橋梁之檢測及補強規範，民國 104 年」、「公路養護規範，民國 101 年」、「橋基保護工設計規範，民國 100 年」、交通部高速公路局「公路橋梁一般目視檢測手冊，民國 85 年」、南非科學暨工業研究委員會「橋梁目視手冊，西元 2002 年」(CSIR-Visual Assessment Manual for Bridges)為參考藍本，並配合現行交通部之橋梁管理系統相關作業手冊訂定。規範內容論及橋梁定期檢測係為掌握橋梁結構之健全度、及早發現造成功能減低或異常之損傷劣化及其原因，而定期以目視方式進行之全面性檢測。

定期檢測採 DERU 檢測系統(亦稱為 DER&U 評估法)，依構件劣化狀況評定劣化程度(D 值)、劣化範圍(E 值)、劣化情況對橋梁結構使用性及用路人安全性之影響(R 值)，以及處置的急迫性(U 值)，橋檢人員於現場記錄劣化構件皆須依劣化情形給予 DERU 評等，並於檢測結束後填寫檢測員意見，內容包含對整體橋梁結構安全性、服務性及是否應安排詳細檢測等，以供管理單位參考。

「臺灣地區橋梁管理系統」(Taiwan Bridge Management System，簡稱 TBMS)於民國 89 年正式上線，供交通部、內政部營建署和其所屬單位，及各縣市政府以至於各鄉鎮市公所使用，透過 TBMS 之資料儲存及資訊同步分享功能，除可有效改善各橋梁管理機關人員離異導致資料遺失之狀況外，並可協助各橋梁管理機關即時快速的掌握橋梁狀況，達到橋梁管理之最基本需求。民國 102 年為強化 TBMS 對橋梁耐洪能力、耐震能力、載重能力及老舊劣化情形之掌握，並確保系統各項登載資料之完整與詳實程度，以「構件化」、「行動化」與「客製化」為開發改良重點推出「第二代臺灣地區橋梁管理系統」(簡稱 TBMS2)。

「行動化」為 TBMS2 改良重點之一，意指橋檢人員於現場可即時記錄劣化構件影像並上傳至 TBMS2，以提升橋梁檢測作業之效率與品質。惟部分橋梁位處山谷或出海口等險峻地形，或遇橋台(墩)構件過高導致橋檢人員無法靠近構件進行檢測，須藉由橋檢車、高空作業車、伸縮桿、UAV 及無人遙控船等工具，如圖 2-1，才可以目視檢視劣化構件，惟上述機械及儀器之使用仍有其限制，因此橋檢人員不易透過間接目視得知構件實際劣化範圍，故開發非接觸式檢測技術使橋檢人員於拍攝劣化構件影像時同步擷取劣化資訊確有其必要，除可於現場及時量測劣化程度外，亦可供日後進行歷程追蹤。

	
<p>橋梁檢測車</p>	<p>高空作業車</p>
	
<p>伸縮桿</p>	<p>UAV</p>
	
<p>多音束測量遙控無人船</p>	<p>水上遙控無人船</p>

圖 2-1 使用輔助工具進行橋梁檢測

參、非接觸式檢測裂縫技術開發

一般橋梁檢測使用市售數位相機進行影像記錄，事後檢視常因拍攝角度、光線及尺寸等因素影響劣化程度判斷。本文開發非接觸式檢測技術，研發之三維取像設備與手機 APP 遠端連線拍攝，讓橋檢人員可於現場即時進行非接觸式量測，拍攝之影像紀錄亦同時保有深度資訊，以便日後於劣化構件歷程追蹤使用。

3.1 三維取像設備規格

本文研發之三維取像設備內含：行動電源、運算核心、高解析度攝影機及測距感測器，整體設備重量(含電池)約為 848g，如圖 3-1。

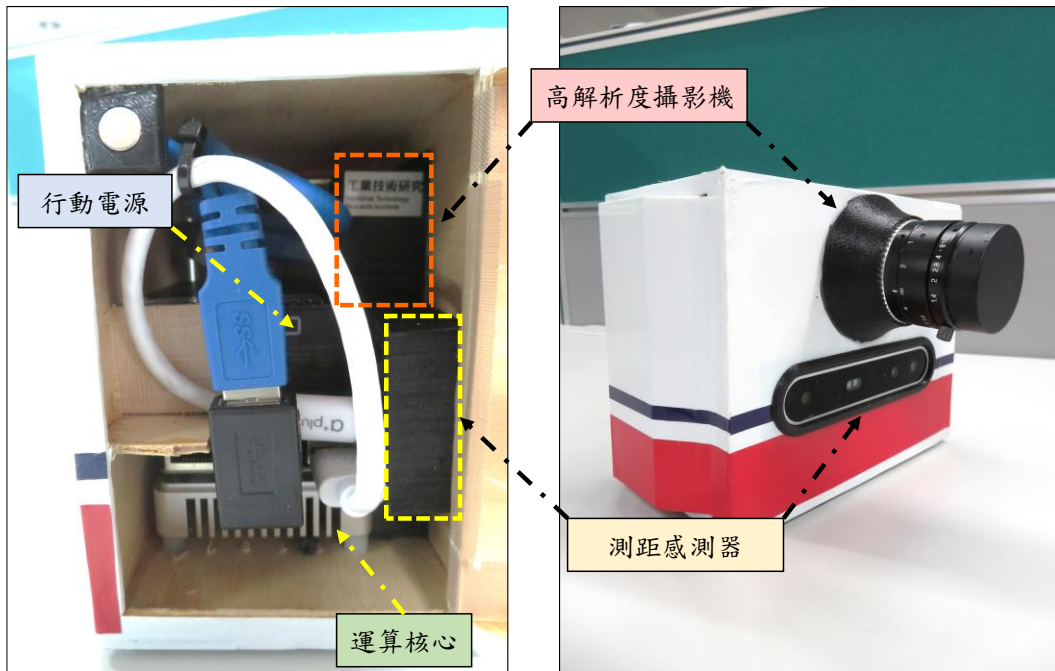


圖 3-1 三維取像設備外觀及內部設計

三維取像設備搭載高解析度攝影機，影像解析度達 5472 x 3648，CMOS 傳感器 1 英寸，垂直及水平視角分別為 21.5°及 28.5°，其詳細規格如表 3-1，攝影機拍攝視角示意圖如圖 3-2。

表 3-1 高解析度攝影機規格

規格	高解析度攝影機
影像解析度	5472 x 3648
焦點距離 (f mm)	25
視角 FOV (垂直 x 水平)	21.5° x 28.5°

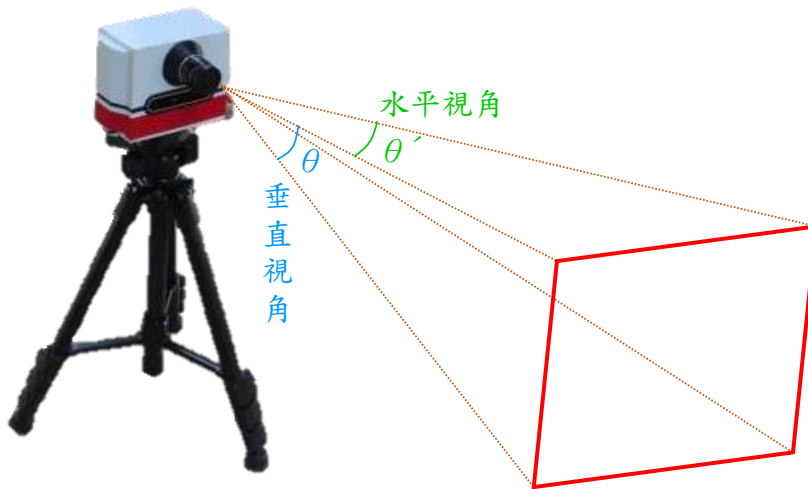


圖 3-2 攝影機拍攝視角示意圖

三維取像設備搭載測距感測器，影像解析度達 1280 x 720，最大偵測距離約 10 公尺其詳細規格如表 3-2。

表 3-2 測距感測器規格

模組	測距感測器規格
操作範圍 (下限-上限)	0.16m ~ 10m
深度解析度	Up to 1280 x 720
視角 FOV (垂直 x 水平)	42.5° x 69.4°

三維取像設備搭載運算核心為 Raspberry pi 3，運算板詳細規格如表 3-3。

表 3-3 運算核心規格

模組	運算核心規格
SoC	Broadcom BCM2837
CPU	4×ARM A53,1.2GHz
GPU	Broadcom VideoCore IV
RAM	1GB LPDDR2 (900 MHz)
Networking	10/100Ethernet, 2.4GHz 802.11n wireless

3.2 三維取像設備檢測及原理

三維取像設備上具備高解析度攝影機與測距感測器，如圖 3-3，前者用以拍攝高解析度影像資料，後者量測被攝物距離取得深度空間資訊，藉由分析上述兩種成像攝影機空間坐標轉換關係後取得三維疊合影像資訊。

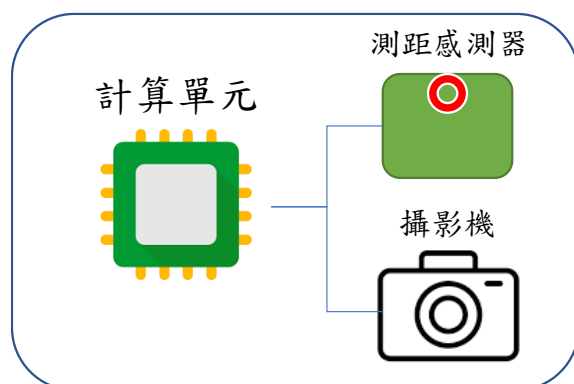


圖 3-3 三維取像設備介接架構圖

一、非接觸式測量原理

裂縫拍攝量測 APP 經由網路與三維取像設備連線，將設備所收到的即時影像透過視訊串流傳送至拍攝手機載具上，並可利用 APP 同步觀看即時影像。待設備鎖定欲檢測之裂縫目標後進行拍照存檔，設備會同時存取高解析度影像資料(攝影機)及深度空間

資訊(測距感測器)，使用者透過 APP 可即時瀏覽拍攝畫面，並針對拍攝畫面新增量測端點畫出欲量測之裂縫線段，設備端運算核心收到量測指令後，即會針對量測目標進行運算，並將計算結果傳回 APP 端顯示，如圖 3-4。

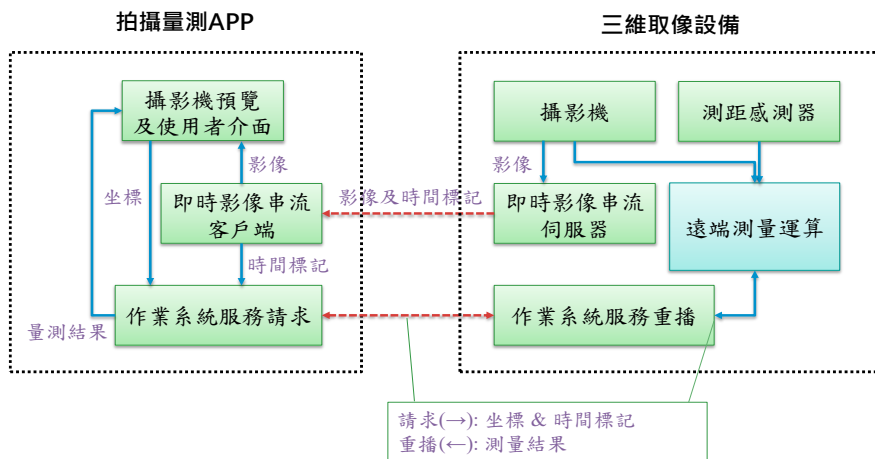


圖 3-4 非接觸式檢測技術架構圖

二、攝影機成像原理

在可見光攝影機的成像過程中，物體所折射的光線，通過鏡片(焦點)後光線投影在攝影機的感測器(底片)上，形成一個左右相反、上下顛倒的物體影像。市售攝影機之光學感測器主要分為光電耦合元件(Coupled Charged Device, CCD)及互補性氧化金屬半導體(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)，如圖 3-5 所示：

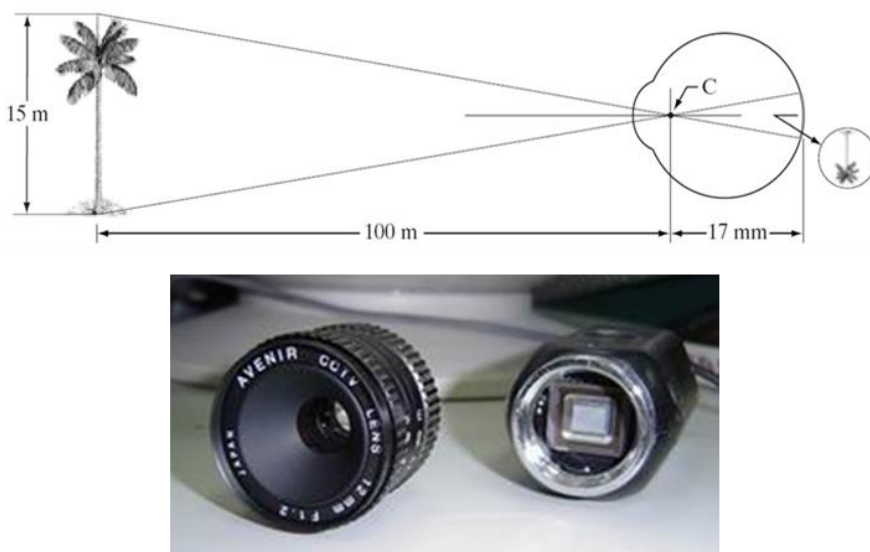


圖 3-5 攝影機成像原理

基於上述原理，真實空間與攝影機之間，即可構成以下三種坐標系統，攝影機坐標轉換如圖 3-6 所示：

- (1) 世界坐標 (World Coordinate System, WCS)：可視為經緯度(X/Y)跟高度(Z)所組成的 3D 坐標系統。
- (2) 攝影機坐標 (Camera Coordinate System, CCS)：以攝影機鏡頭為原點之 3D 坐標系統。若攝影機之拍攝方向與位置已知，則 CCS 與 WCS 間可矩陣轉換。
- (3) 影像坐標 (Image Coordinate System, ICS)：投影在 CCD/CMOS 上的 2D 坐標，其原點一般為影像的左上角。電腦上觀看之數位影像，即是將 ICS 等倍轉換至螢幕(單位為像素, Pixel)，此 ICS 轉換至數位影像之比率通常稱為 DPI (Dot Per Inch)，即每英寸要轉換為多少像素。

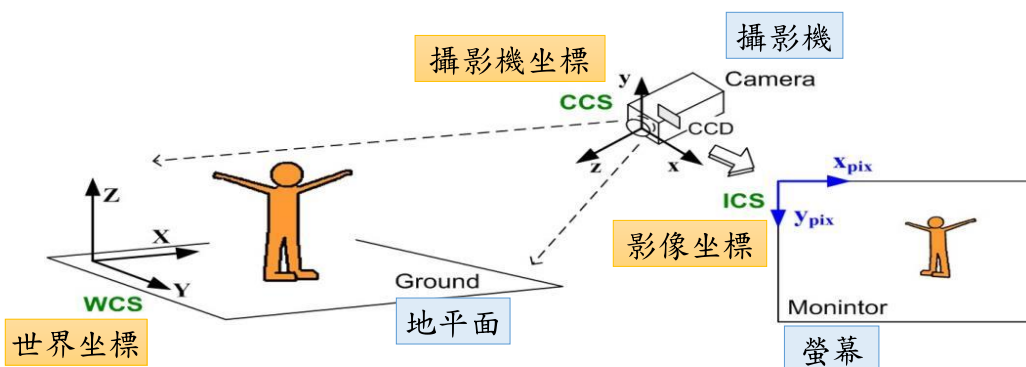


圖 3-6 攝影機坐標轉換

若成像坐標為(u,v)，真實空間坐標為(X,Y,Z)，透過坐標間轉換為表示法如下：

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

成像平面坐標 = [內部參數矩陣][外部參數矩陣][世界坐標]

三、測距感測器原理

本文所使用之測距感測儀器係採主動式深度感測技術，其原理為透過針對目標物發射光線，並轉換算成被攝物距離取得深度空間資訊，用以得出三維深度，如圖 3-7。基本零組件包括發射器、接收器，其優點是反應速度快、影像解析度高及低光源下仍可正常運作，目前測距感測器已應用在醫療檢測、工業用機器視覺等領域，在消費性電子方面，則應用在遊戲機、AR/VR 及智慧車。

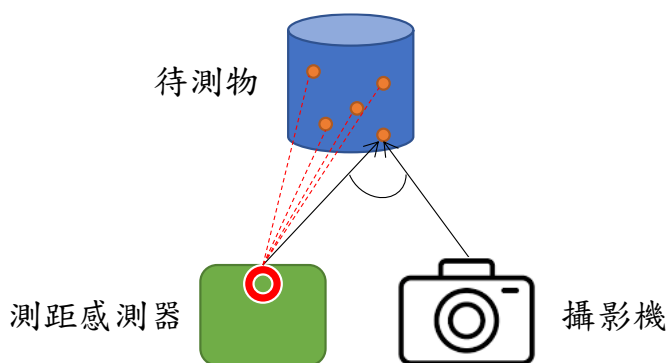


圖 3-7 測距感測器原理示意圖

本文所採用之測距感測器，深度影像解析度達 1280 x 720，最大偵測距離約 10 公尺，並將三維深度影像與高解析度影像結合應用，發展非接觸式影像量測技術。

四、攝影機校正及內外部參數計算

一般相機在加上鏡頭後會帶來失真，當光線在鏡頭邊緣彎曲時比在光學中心彎曲時徑向畸變較大，一般分為枕狀變形(pincushion)及桶狀變形(barrel)，如圖 3-8，為計算真實世界正確坐標值需事先對相機做內部參數校正。

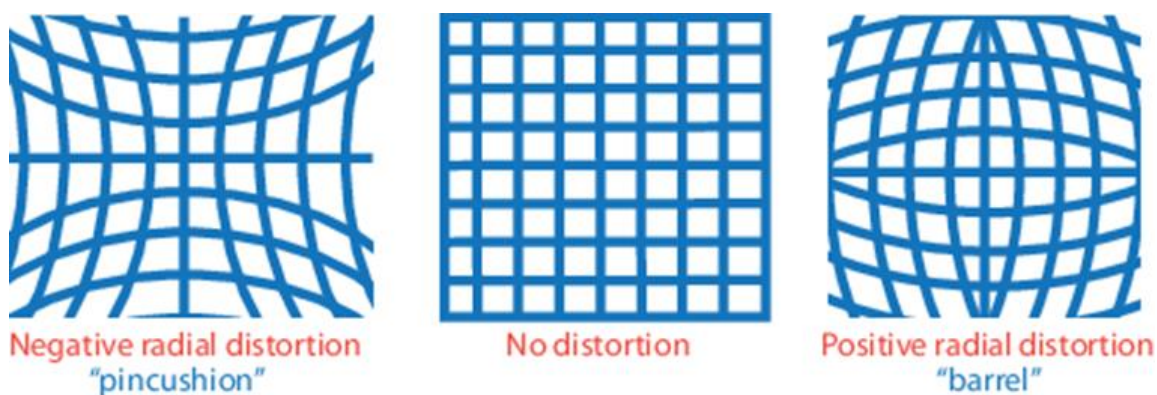


圖 3-8 一般攝影常見變形

一般常見的失真方式有徑向(radial)和切向(tangential)兩個因素，徑向失真會產生桶狀或類似魚眼效果的失真，對於一個校正前的像素點(X, Y)，校正後的位置在(x_corrected, y_corrected)，以下為徑向失真校正前後位置的關係：

$$x_{corrected} = x + [1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6]$$

$$y_{corrected} = y + [1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6]$$

另一種失真為切向失真，因為圖像拍攝鏡頭未完全平行於成像平面對齊。因此，圖像中的某些區域可能看起來比預期的更近，以下為徑向失真校正前後位置的關係：

$$x_{corrected} = x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)]$$

$$y_{corrected} = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy]$$

因此失真係數可歸類為五個參數，扭曲參數(Distortion coefficients) = (k1, k2, k3, p1, p2)，除此之外可計算攝影機內在參數。攝影機內在參數包括焦距 (fx, fy)，光學中心 (cx, cy) 等信息，此參數源自於攝影機被製造時決定，因此一旦經過計算取得後，即可儲存起來使用。

$$\text{camera matrix (相機內參數)} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由於雙鏡頭所拍攝之角度不同，造成影像在 3D 空間上成像也不同，因此影像經由仿射變換矩陣轉換，將待檢測之深度影像與高解析度影像投影至共同平面後，才能藉此推估進行量測估算，如圖 3-9。其中外部參數包含旋轉(Rotation)及位移(Translation)，兩坐標可轉化如下：

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \text{KM}_0^c \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \text{KM}_0^c \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0^c & T_0^c \\ 0_{1*3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

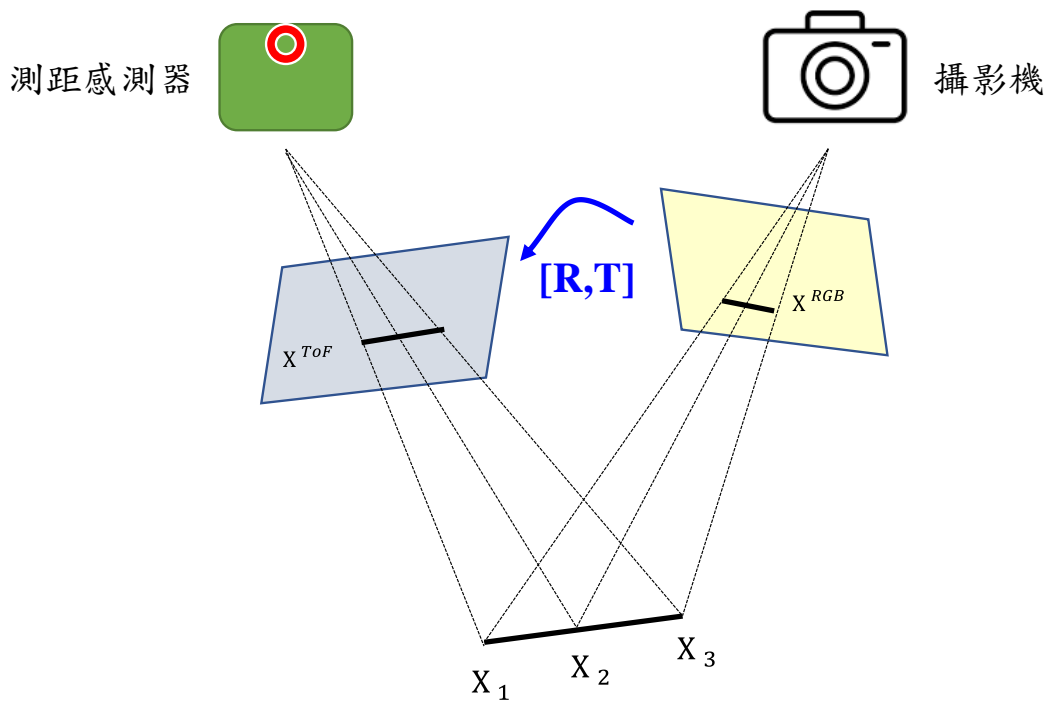


圖 3-9 攝影機外部參數轉換

為了計算上述攝影機參數，需找尋現實世界中已知固定距離直線作為參考值，一般使用棋盤格影像用來校正參數，如圖 3-10，在鏡頭拍攝下能看出棋盤格於畫面中產生扭曲非直線狀態。

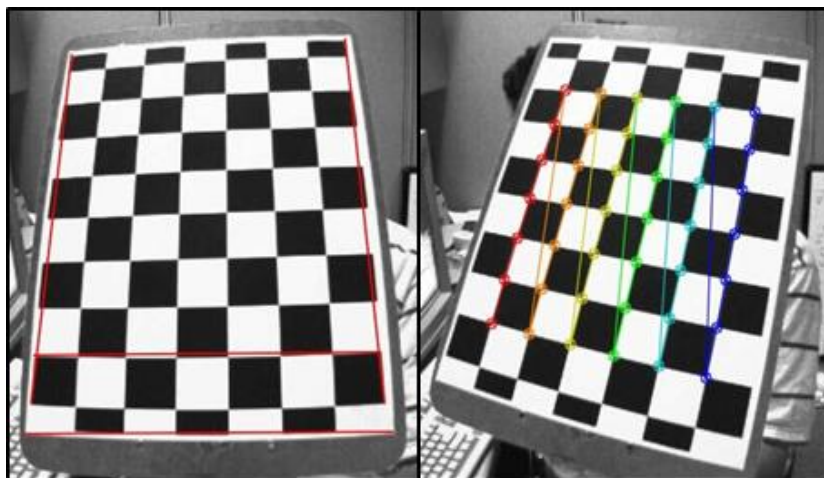


圖 3-10 攝影機棋盤校正

以相同鏡頭拍攝多張不同角度拍攝之棋盤格影像，利用棋盤格上黑白格之間的角點作為影像特徵點，計算投影區間後取得攝影機失真參數及內參數，並進行攝影機校正，如圖 3-11。

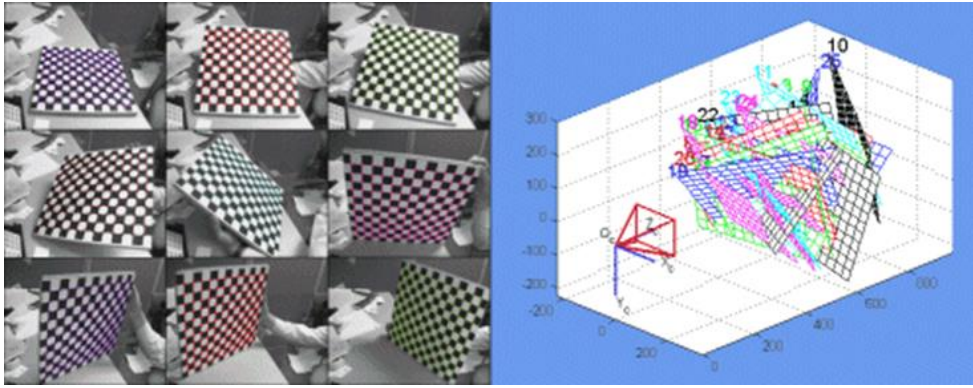


圖 3-11 攝影機利用棋盤格計算內外參數

三維取像設備所搭載之高解析度攝影機，其高解析度影像解析度達 5472 x 3648，與測距感測器所取得深度影像解析度達 1280 x 720，影像經由仿射變換矩陣轉換，將待檢測之深度影像與高解析度影像投影至共同平面。透過線性插值法 (linear interpolation)，將連接兩個已知量的點來求得在這兩個已知距離間的位置，如圖 3-12。

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}$$

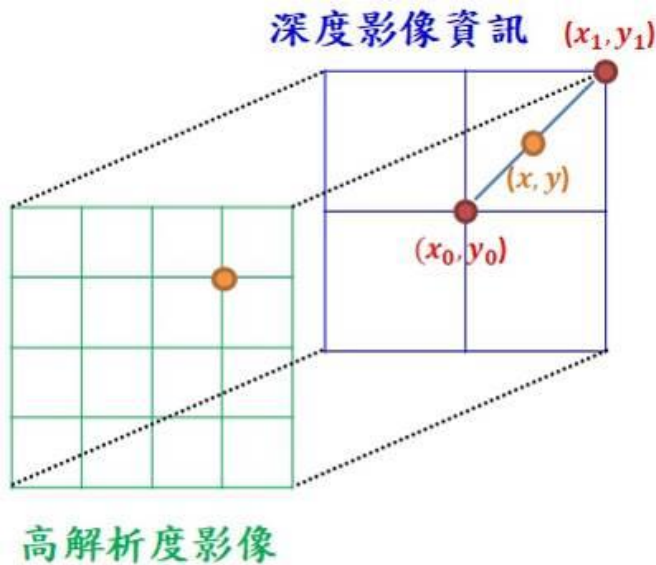


圖 3-12 影像線性插值

3.3 非接觸式量測 APP

為配合 TBMS2「行動化」所有檢測作業於橋址現場完成之要求，故研發搭配非接觸式量測使用之 APP 程式，可與三維取像設備連線取得即時檢測影像並進行即時拍攝及量測，其細部功能包含：影像預覽、局部放大預覽、拍照、裂縫量測、影像強化模組

及儲存檔案等，操作流程如圖 3-13 所示。

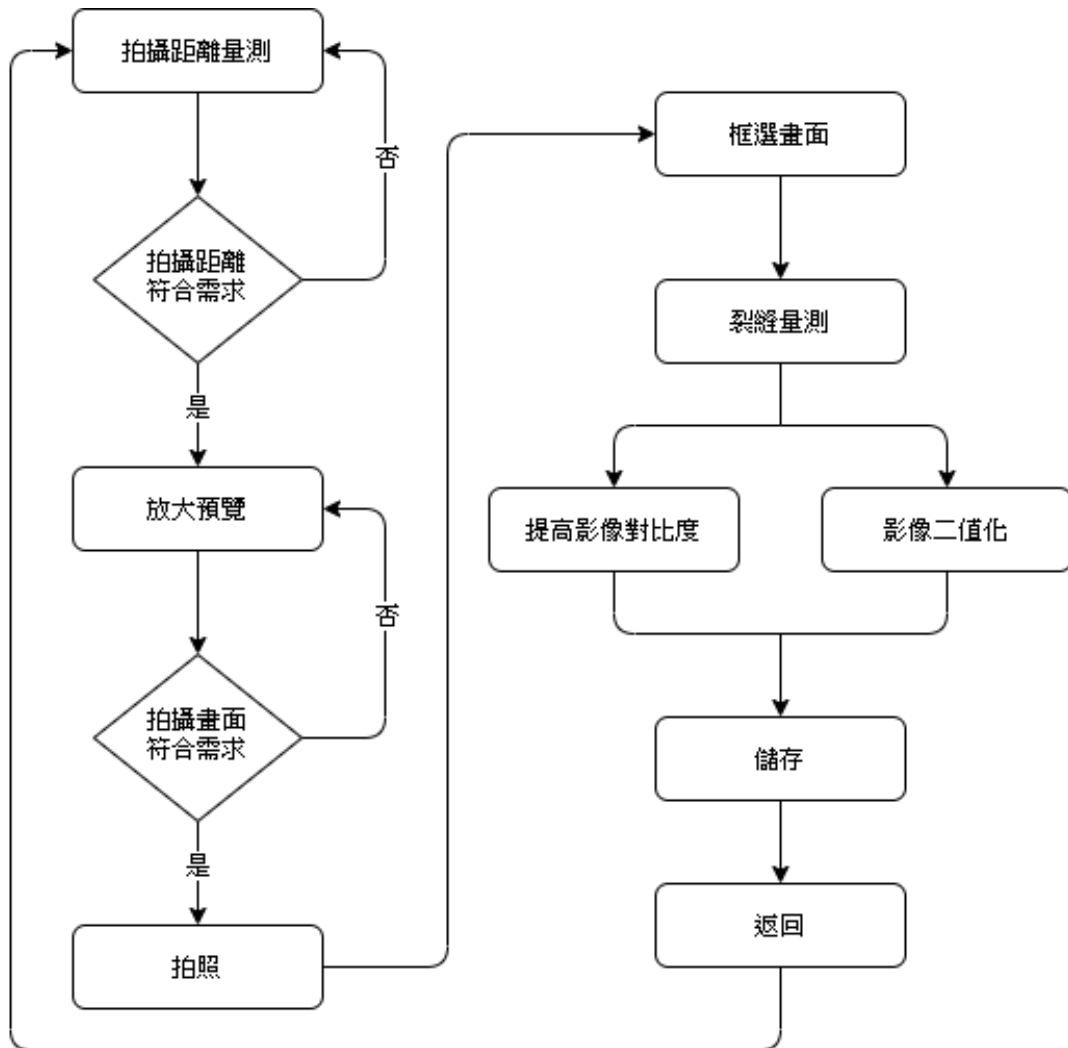


圖 3-13 非接觸式量測 APP 操作流程

使用裂縫拍攝量測 APP 時，須先與三維取像設備內建之 Wi-Fi 連線，藉此取得即時預覽畫面，透過點擊待量測區域畫面，系統會以紅點顯示點擊位置，並透過三維取像設備計算該點與設備之距離，如圖 3-14 所示。

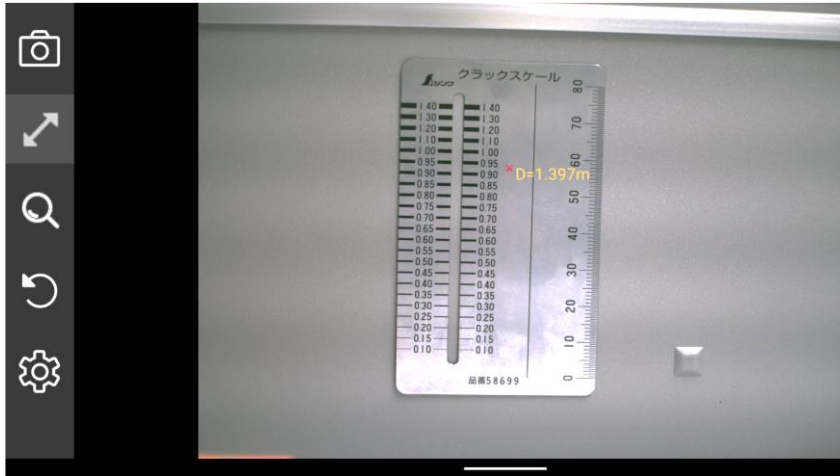


圖 3-14 APP 距離量測功能

使用者可透過放大預覽功能將待測區域置於畫面中心，鎖定待檢測目標進行拍照，擷取之影像可透過雙指縮放進而框選出 ROI(Region of interest)，如圖 3-15~3-16 所示。

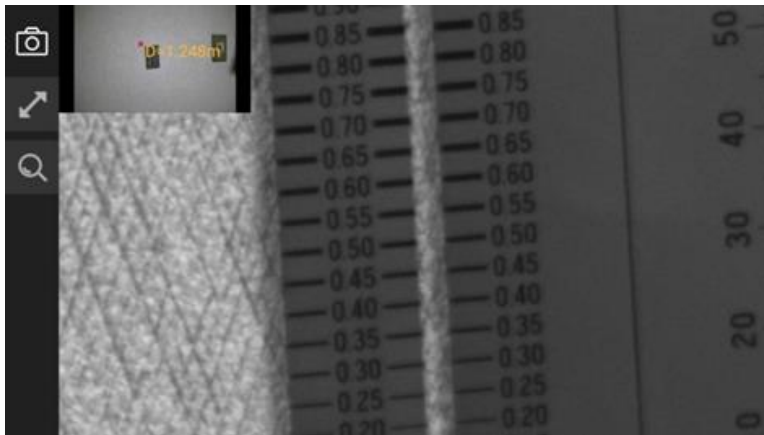


圖 3-15 APP 放大預覽功能

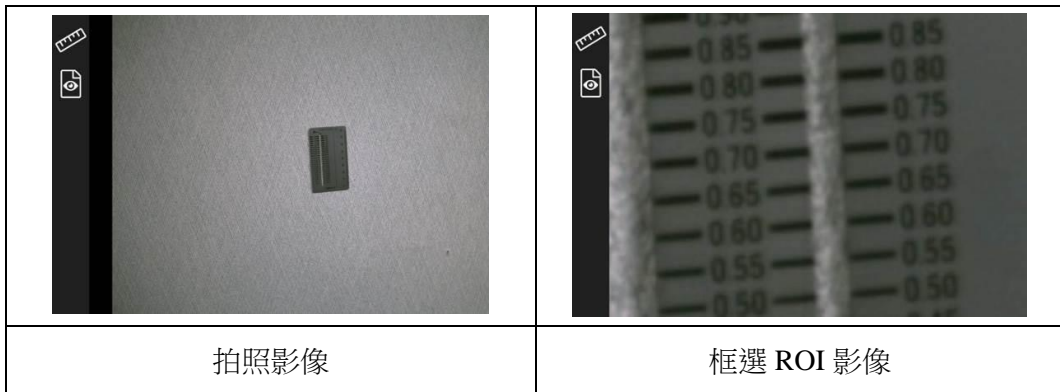


圖 3-16 APP 拍照及框選功能

肆、室內校正與橋梁現地場域驗證

4-1 三維取像設備室內校正

橋檢人員於現地檢測因部分橋梁位置險峻或構件過高而不易接近檢測，可藉由橋檢車、高空作業車及伸縮桿等工具將相機與待測物距離縮短至 1~2 公尺，另考量部分混凝土裂縫較為細微，故設定三維取像設備之精度為距待測物 2 公尺遠拍攝之空間解析度須達 0.3mm(含)以下。

三維取像設備中高解析攝影機與測距感測器由於拍攝之角度不同，造成兩者擷取之影像在 3D 空間成像相異，因此三維取像設備組裝完成後，預先於實驗室內進行攝影機內外參數校正率定。

為測試完成率定之三維取像設備量測精準度，在室內環境下將透明裂縫量測尺黏貼於牆壁上(裂縫尺規格詳表 4-1)，並將三維取像設備架設於 2 公尺外進行非接觸式量測，如圖 4-1，分別對裂縫寬度 0.30mm~1.00mm 之線段個別進行 2 次量測，並將量測數據加以平均後計算其量測差值與誤差比率，如表 4-2 所示。

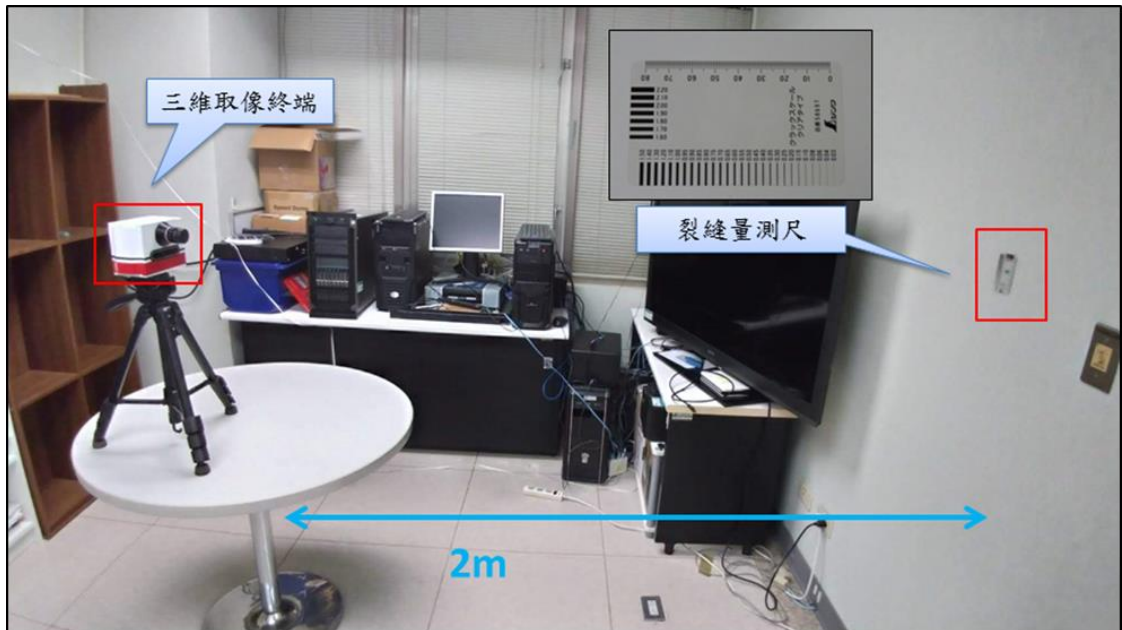


圖 4-1 三維取像設備室內驗證

表 4-1 室內驗證用裂縫量測尺規格


	品名
	SHINWA 58697 裂縫量測尺
	刻度線寬精度
	±0.02mm
	尺寸
	55 x 91 x 0.2 mm

表 4-2 三維取像設備室內驗證數據整理

編號	裂縫尺 刻度 (mm)	第一次 量測寬度 (mm)	第二次 量測寬度 (mm)	平均 量測寬度 (mm)	平均量測差值 (mm)	平均誤差比率 (%)
1	1.00	1.000	1.010	1.005	0.005	1%
2	0.95	0.915	0.985	0.950	0.000	0%
3	0.90	0.910	0.915	0.913	0.013	1%
4	0.85	0.845	0.820	0.833	0.017	2%
5	0.80	0.810	0.735	0.773	0.027	3%
6	0.75	0.735	0.730	0.733	0.017	2%
7	0.70	0.730	0.730	0.730	0.030	4%
8	0.65	0.640	0.660	0.650	0.000	0%
9	0.60	0.650	0.550	0.600	0.000	0%
10	0.55	0.545	0.600	0.573	0.023	4%
11	0.50	0.530	0.550	0.540	0.040	8%
12	0.45	0.440	0.450	0.445	0.005	1%
13	0.40	0.400	0.360	0.380	0.020	5%
14	0.35	0.395	0.365	0.380	0.030	9%
15	0.30	0.330	0.326	0.328	0.028	9%
				平均值	0.017	3.3%

實驗結果顯示三維取像設備距裂縫量測尺 2 公尺遠之平均量測差值為 0.017mm(3.3%)，除小於裂縫量測尺自身刻度誤差(±0.02mm)外，亦符合設定之目標精度，證實經率定校正完成之三維取像設備進行非接觸式量測成果具可信度。

因實驗室環境因素與橋梁現地相比較為單純，為測試三維取像設備於現地環境下是否會受光線及周遭環境影響測量結果，及探討非接觸式量測與裂縫量測尺量測差異，故

擇選台 61 線西湖溪橋及台 13 甲線德照橋進行場域驗證作業。

4-2 場域驗證-台 61 線西湖溪橋

台 61 線西湖溪橋位於苗栗縣西湖鄉，屬公路總局苗栗工務段管轄橋梁，民國 84 年 10 月興建完成，橋齡已逾 24 年，為台 61 線連接西湖溪南北岸之重要橋梁，如圖 4-2，查交通部全國橋梁基本資料，摘列西湖溪橋相關基本資料如表 4-3。西湖溪橋位處西部臨海之感潮帶，距海岸 300 公尺以內，屬「嚴重鹽害區」，橋梁耐久能力受到嚴苛的挑戰，橋墩及其他混凝土構件出現嚴重鋼筋腐蝕、混凝土裂縫及剝落情形，為苗栗工務段重點監控橋梁之一。



圖 4-2 西湖溪橋位置圖

表 4-3 西湖溪橋基本資料

橋名	台 61 線-西湖溪橋(北上線、南下線)				
橋頭 里程	106K+460M	竣工 年月	84 年 10 月	跨越 物體	西湖溪
橋梁 總長	360M	最大 淨寬	18.6M	跨距 分配	1@20M+ 8@40M+ 1@20M
結構 形式	梁式橋	橋台 型式	懸臂式	橋台 基礎型式	樁基礎
橋墩 型式	單柱式	橋墩 基礎型式	樁基礎	橋基 保護工法	無

由於西湖溪橋位於西湖溪出海口，屬於感潮河段橋梁，故場域驗證作業選於乾潮時段進行，場域驗證作業係以三維取像設備擷取目標影像，透過非接觸式量測 APP 解算裂縫寬度後，再輔以裂縫量測尺進行量測比對，如圖 4-3。由於三維取像設備精度(0.017mm)優於裂縫量測尺(0.05mm)，故以三維取像設備量測結果作為標準，探討傳統方法以肉眼使用裂縫量測尺所存在之量測誤差。本次作業一共量測 10 組裂縫樣本進行量測數據比對，由表 4-4 可知，在 2 公尺拍攝距離內使用非接觸式量測與人工使用裂縫尺量測進行比較，非接觸式量測成果與人工量測成果差異極小(量測差異皆 $\leq 0.06\text{mm}$)，可知傳統使用裂縫量測尺量測結果仍存在極小誤差，並實證三維取像設備在橋梁現地環境下仍可正常進行量測。

非接觸式量測 APP 之影像分析功能輔助，如圖 4-4 所示；西湖溪橋場域驗證測量成果如圖 4-5~4-6 所示。



圖 4-3 西湖溪橋場域驗證作業照片

表 4-4 西湖溪橋量測裂縫寬度實驗數據

編號	裂縫位置	拍攝距離 (m)	非接觸式量測寬度(mm)	裂縫尺量測寬度(mm)	相對量測差值 (mm)
1	S-P9-1 (1)	1.90	0.50	0.50	0.00
2	N-P8-2 (1)	1.71	1.39	1.40	0.01
3	N-P8-2 (2)	1.53	2.07	2.10	0.03
4	S-P7-2 (1)	1.46	0.41	0.35	0.06
5	N-P7-1 (1)	1.64	0.35	0.35	0.00
6	N-P5-1 (1)	1.51	0.93	0.90	0.03
7	N-P5-2 (1)	1.73	0.32	0.35	0.03
8	N-P5-2 (2)	1.85	0.38	0.40	0.02
9	S-P5-1 (1)	1.67	0.73	0.70	0.03
10	S-P5-1 (2)	1.77	0.53	0.55	0.02

註：1.裂縫位置 N 代表北上線；S 代表南下線。

2.現場裂縫尺刻度線寬精度：0.05mm。

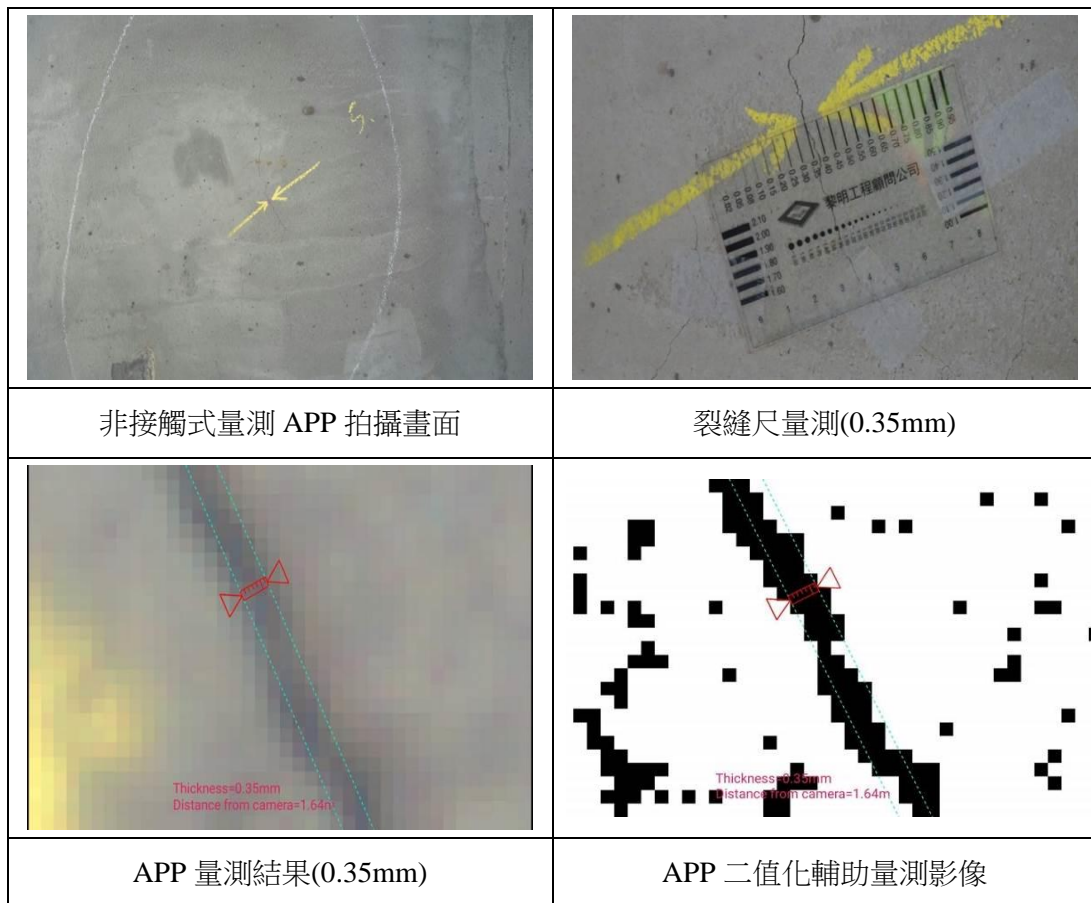


圖 4-4 西湖溪橋影像分析功能輔助示意圖


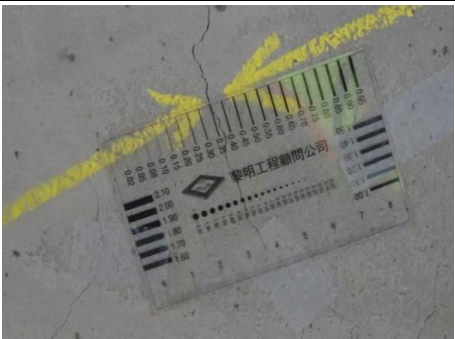

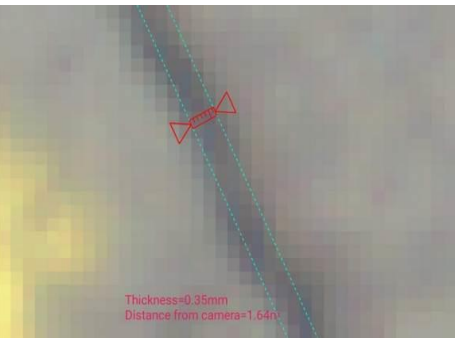
	
<p>量測作業側拍</p>	<p>裂縫尺量測寬度 0.35mm</p>
	
<p>APP 拍攝畫面</p>	<p>非接觸式量測寬度 0.35mm</p>

圖 4-5 西湖溪橋場域驗證測量成果(一)


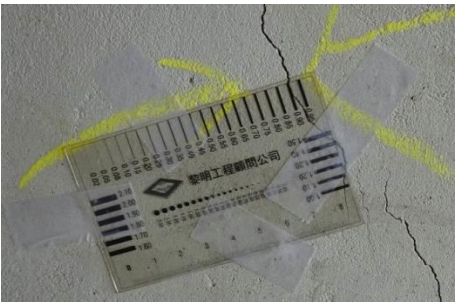

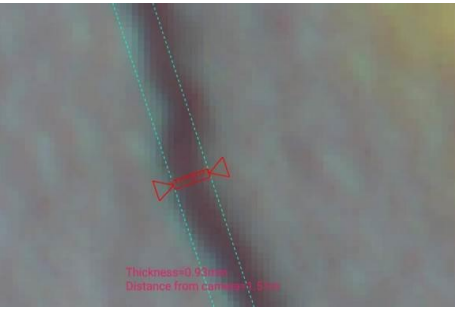
	
<p>量測作業側拍</p>	<p>裂縫尺量測寬度 0.90mm</p>
	
<p>APP 拍攝畫面</p>	<p>非接觸式量測寬度 0.93mm</p>

圖 4-6 西湖溪橋場域驗證測量成果(二)

4-3 場域驗證-台 13 甲線德照橋

台 13 甲線德照橋位於苗栗縣造橋鄉，屬公路總局苗栗工務段管轄橋梁，民國 96 年 10 月興建完成，橋齡已逾 12 年，為台 13 甲線往來竹南鎮及造橋鄉之重要橋梁，如圖 4-7，查交通部全國橋梁基本資料，摘列德照橋相關基本資料如表 4-5。依據「107 年度本處苗栗、彰化、谷關及信義段省道橋梁目視 DERU 檢測評估工作(二代 TBMS)」橋梁檢測成果資料顯示，德照橋之大梁及橋墩有乾縮裂縫情形，部分帽梁混凝土具結構裂縫(明顯裂縫，但沒有滲水或鋼筋銹蝕現象)，應持續觀測後續裂縫是否有擴大之情形。

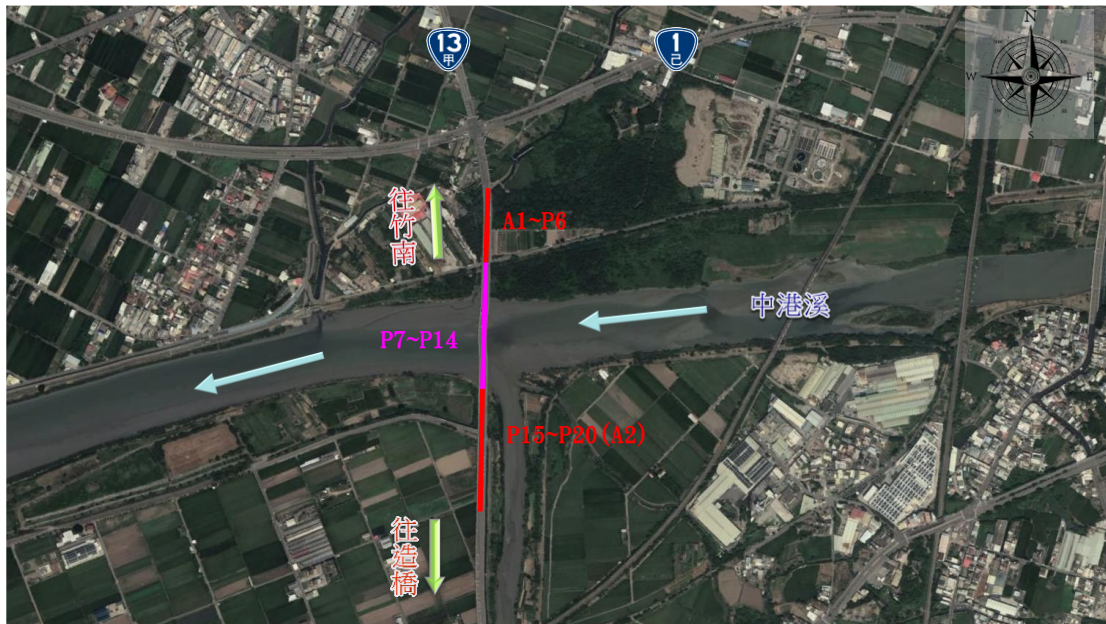


圖 4-7 德照橋位置圖

表 4-5 德照橋基本資料

橋名	台 13 甲線-德照橋				
橋頭里程	4K+5M	竣工年月	96 年 10 月	跨越物體	中港溪
橋梁總長	785M	最大淨寬	19M	跨距分配	5@38M+ 10@40.5M+ 5@38M
結構形式	梁式橋	橋台型式	半短塊式	橋台基礎型式	樁基礎
橋墩型式	多柱式	橋墩基礎型式	樁基礎	橋基保護工法	無

德照橋場域驗證作業係以三維取像設備擷取目標影像，透過非接觸式量測 APP 解算裂縫寬度後，再輔以裂縫量測尺進行量測比對，如圖 4-8。由於三維取像設備精度(0.017mm)優於裂縫尺(0.05mm)，故以三維取像設備量測結果作為標準，探討傳統方法以肉眼使用裂縫量測尺所存在之量測誤差。本次作業一共量測 10 組裂縫樣本進行量測數據比對驗證，由表 4-6 可知，在 2 公尺拍攝距離內使用非接觸式量測與人工使用裂縫尺量測進行比較，非接觸式量測成果與人工量測成果差異極小(量測差異皆 $\leq 0.04\text{mm}$)，可知傳統使用裂縫量測尺量測結果仍存在極小誤差，並實證三維取像設備在橋梁現地環境下仍可正常進行量測。

非接觸式量測 APP 之影像分析功能輔助，如圖 4-9 所示；德照橋場域驗證測量成果如圖 4-10 所示。



圖 4-8 德照橋場域驗證作業照片

表 4-6 德照橋量測裂縫寬度實驗數據

編號	裂縫位置	拍攝距離 (m)	非接觸式量測寬度(mm)	裂縫尺量測寬度(mm)	相對量測差值 (mm)
1	P4(S5) (1)	2.06	0.39	0.40	0.01
2	P4(S5) (2)	1.58	0.31	0.30	0.01
3	P4(S5) (3)	1.90	0.36	0.35	0.01
4	P4(S5) (4)	2.55	1.02	1.00	0.02
5	P4(S5) (5)	2.13	0.54	0.50	0.04
6	P4(S4) (1)	2.22	0.41	0.40	0.01
7	P4(S4) (2)	2.15	0.40	0.40	0.00
8	P4(S4) (3)	2.01	0.39	0.35	0.04
9	P4(S4) (4)	1.92	0.41	0.40	0.01
10	P3(S4)	1.64	0.31	0.30	0.01

註：現場裂縫尺刻度線寬精度：0.05mm。

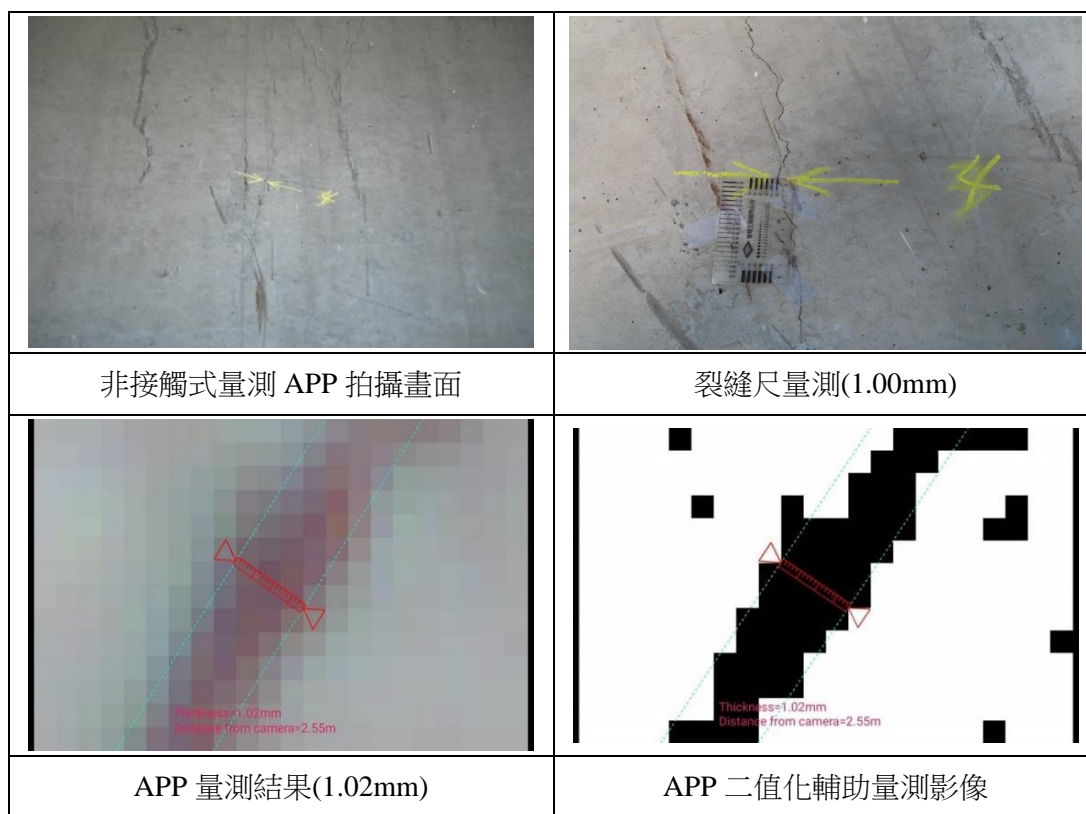


圖 4-9 德照橋影像分析功能輔助示意圖

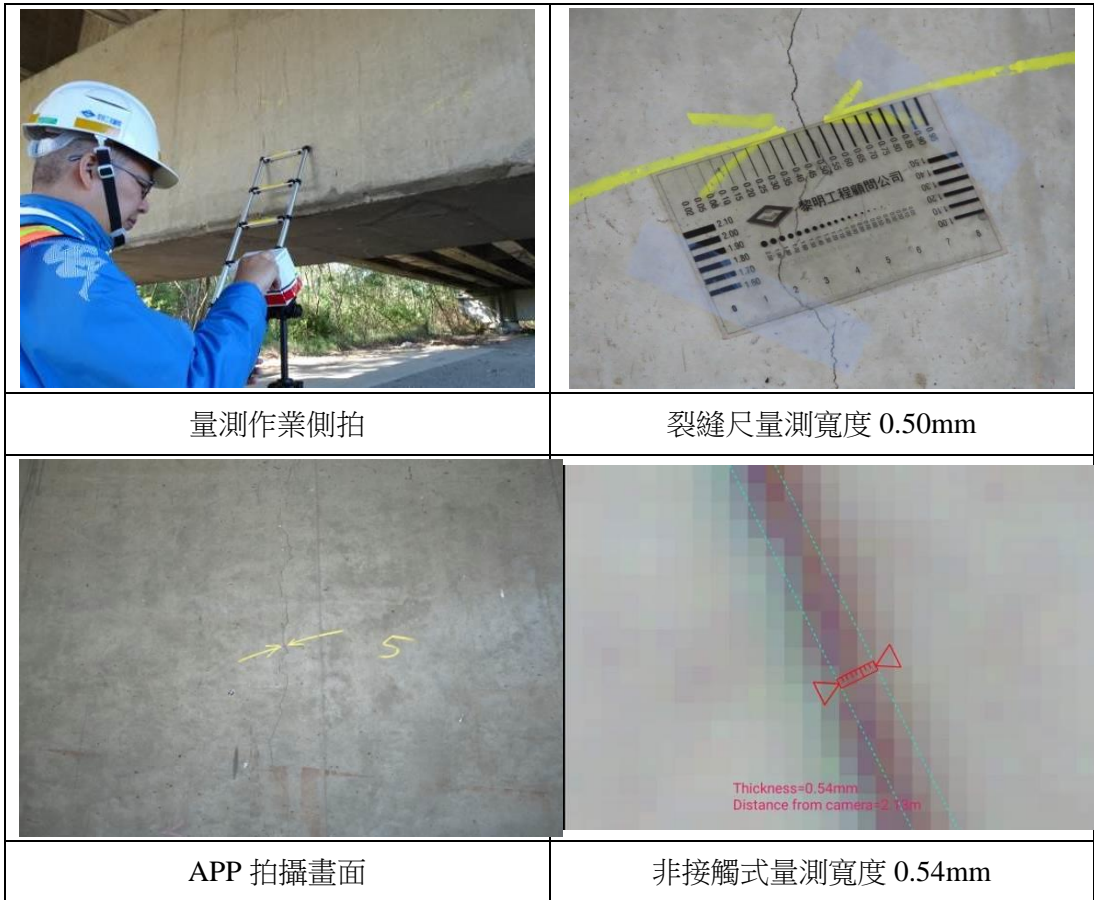


圖 4-10 德照橋場域驗證測量成果

4-4 多角度裂縫寬度量測成果分析

為驗證裂縫量測在不同角度上是否會有所差異，因此在台 61 線西湖溪橋進行三組裂縫多角度量測試驗。針對同一條裂縫在相近的拍攝距離下，將三維取像設備設置於裂縫的正面、左側 45°及右側 45°三個方位進行量測，量測結果如表 4-7 及圖 4-11~4-13 所示，經非接觸式量測 APP 量測結果與裂縫量測尺量測結果比較，發現部分量測差值>裂縫尺精度 0.05mm，推估應為三維取像設備拍攝角度與裂縫量測尺量測角度不同造成判釋結果差異，惟三組裂縫不同角度之量測差值皆≤0.1mm，證實在不同方位下(不考慮極端角度)之非接觸式測量成果與裂縫量測尺量測成果差異不大，仍適合輔助橋檢人員作為非接觸式量測工具使用。

表 4-7 西湖溪橋多角度裂縫寬度測量實驗數據

編號	裂縫位置	拍攝方位	拍攝距離 (m)	非接觸式量測寬度 (mm)	裂縫尺量測寬度 (mm)	量測差值 (mm)
1	S-P9-1	左側 45°	1.92	0.51	0.60	0.09
		正面	1.90	0.50		0.10
		右側 45°	1.98	0.52		0.08
2	N-P8-2	左側 45°	1.68	1.43	1.40	0.03
		正面	1.71	1.39		0.01
		右側 45°	1.76	1.42		0.02
3	N-P8-2	左側 45°	1.45	2.17	2.10	0.07
		正面	1.53	2.07		0.03
		右側 45°	1.47	2.13		0.03


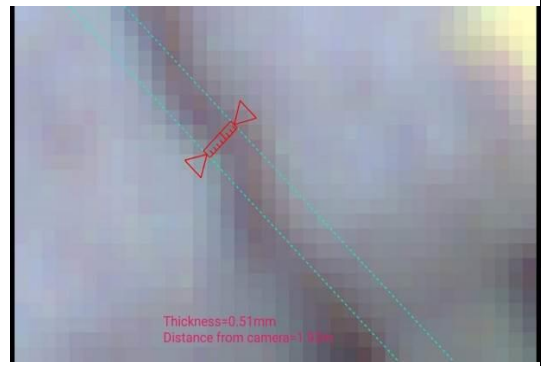



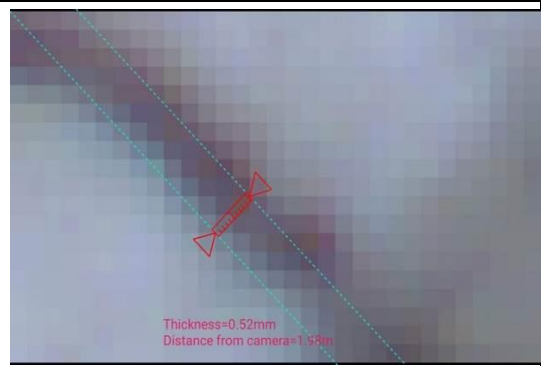
	 <p>Thickness=0.51mm Distance from camera=1.92m</p>
<p>APP 拍攝畫面(左側)</p>	<p>APP 量測結果(左側)</p>
	 <p>Thickness=0.50mm Distance from camera=1.94m</p>
<p>APP 拍攝畫面(正面)</p>	<p>APP 量測結果(正面)</p>
	 <p>Thickness=0.52mm Distance from camera=1.97m</p>
<p>拍 APP 拍攝畫面(右側)</p>	<p>APP 量測結果(右側)</p>

圖 4-11 西湖溪橋多角度裂縫寬度測量成果(1/3)


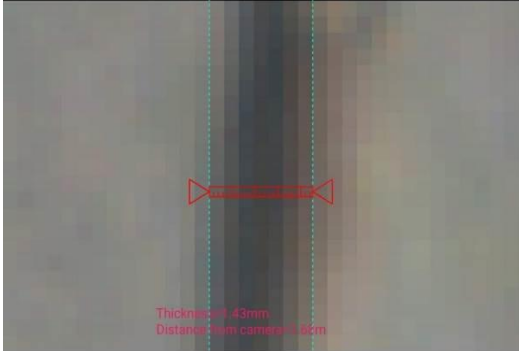




	
<p>APP 拍攝畫面(左側)</p>	<p>APP 量測結果(左側)</p>
	
<p>APP 拍攝畫面(正面)</p>	<p>APP 量測結果(正面)</p>
	
<p>拍 APP 拍攝畫面(右側)</p>	<p>APP 量測結果(右側)</p>

圖 4-12 西湖溪橋多角度裂縫寬度測量成果(2/3)


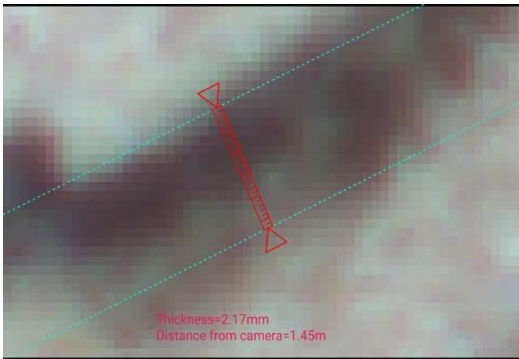




	 <p>Thickness=2.17mm Distance from camera=1.45m</p>
<p>APP 拍攝畫面(左側)</p>	<p>APP 量測結果(左側)</p>
	 <p>Thickness=2.07mm Distance from camera=1.53m</p>
<p>APP 拍攝畫面(正面)</p>	<p>APP 量測結果(正面)</p>
	 <p>Thickness=2.13mm Distance from camera=1.47m</p>
<p>拍 APP 拍攝畫面(右側)</p>	<p>APP 量測結果(右側)</p>

圖 4-13 西湖溪橋多角度裂縫寬度測量成果(3/3)

伍、AI 自動偵測裂縫技術研發

5.1 深度學習介紹與發展

深度學習近年開始蓬勃發展，深度學習係屬機器學習的一條分支，透過特定方式進行特徵擷取，再選擇合適之神經網路架構進行電腦訓練。

較有名的神經網路有三個：深度神經網路(Deep Neural Networks, DNN)、卷積神經網路(Convolutional Neural Networks, CNN)及循環神經網路(Recurrent Neural Networks, RNN)。深度神經網路由輸入層、數個隱藏層及輸出層所組成，每個輸入層、隱藏層或是輸出層都包含一個以上的節點，圖 5-1 為深度神經網路架構示意圖；卷積神經網路是數層的卷積層(Convolution layer)及池化層(Pooling layer)，最後再加上全連接層(Fully connected layer)所組成的，圖 5-2 為卷積神經網路架構示意圖；而循環神經網路是把時間序列這部分考慮進去，主要是應用在語音辨識或文句辨識。

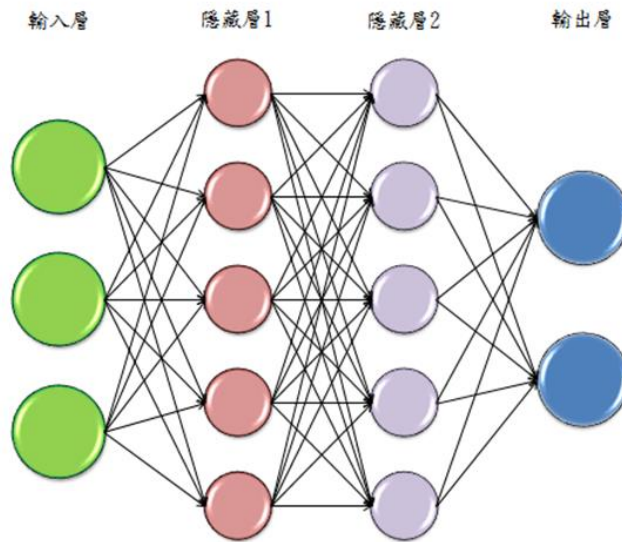


圖 5-1 深度神經網路架構示意圖

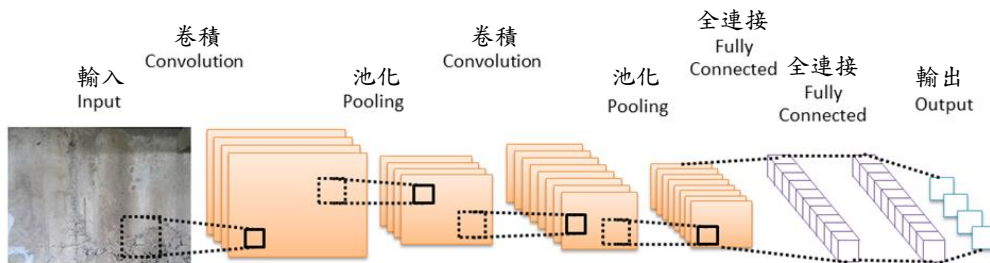


圖 5-2 卷積神經網路架構示意圖

在影像辨識當中最常被拿來使用的架構就是卷積神經網路，卷積神經網路有以下幾項優點：

1. 簡單使用，可輕易上手訓練及測試。
2. 自動特徵提取，無須花時間手動提取特徵。
3. 降低影像複雜度，僅需針對局部感受視野進行訓練及測試。
4. 降低結構複雜度，雖會減少訓練參數，但仍有顯著效果。

卷積神經網路主要可分成三大塊，分別為卷積層、池化層及全連接層，以下分別對這三要素做詳細的說明。

1. 卷積層是將影像與特定的特徵檢測核(Feature Detector)進行卷積運算，矩陣相乘再相加得到的值儲存在特徵地圖(Feature Map)上，當有多個濾波器(filter)時，就會產生多個 Feature map，透過卷積層可以萃取出物體的特徵，如圖 5-3。簡單使用，可輕易上手訓練及測試。

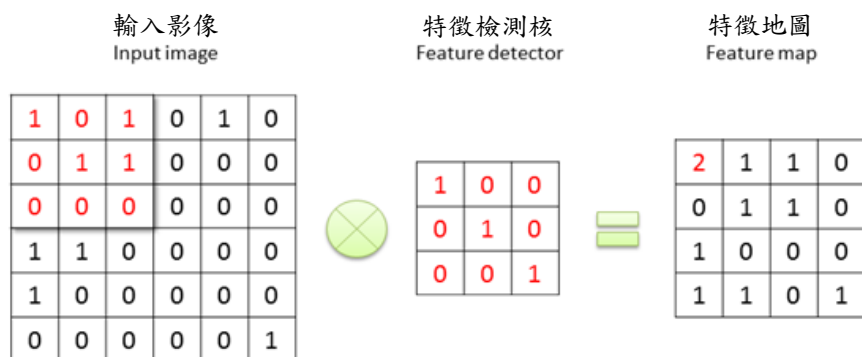


圖 5-3 卷積層運算示意圖

2. 池化層大部分是採用最大池化(Max Pooling)的方式，在特定大小的矩陣內留下最大值，存在池化特徵地圖(pooled feature map)上，讓特徵不減少的情況下使計算量變小，如圖 5-4。

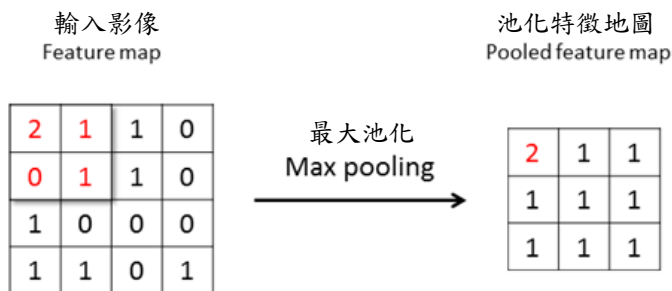


圖 5-4 池化層運算示意圖

3. 全連接層是將前面卷積層與池化層計算出的值連接到最基本的神經網路，最後得到分類，如圖 5-5。

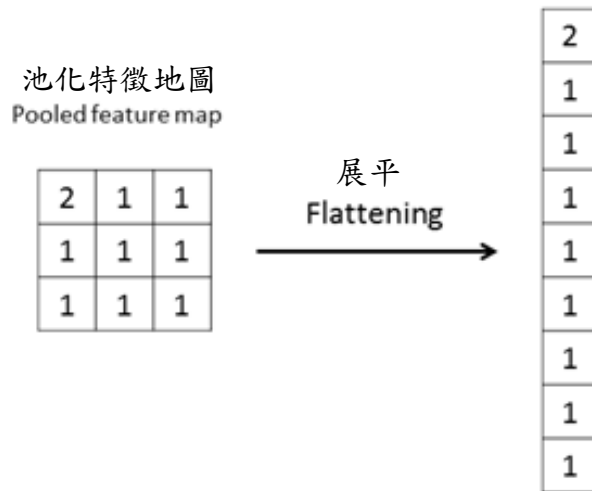


圖 5-5 全連接層運算示意圖

5-2 訓練影像蒐集與標記

欲進行電腦深度學習訓練，需針對訓練標的(混凝土裂縫)進行標記作業，人工標記作業屬電腦深度學習過程中最耗費時間及人力之項目，作業人員須先利用滑鼠點擊的方式將劣化區域(混凝土裂縫)輪廓框選出來，每完成一處裂縫區域須將其命名為裂縫(crack)進行分類，完成影像中全數裂縫框選及標記才算作業結束，如圖 5-6 所示。



圖 5-6 裂縫標記完成示意圖

5-3 深度學習應用於裂縫偵測

混凝土裂縫於影像中屬較細微之特徵，為取得影像中微觀資訊，須先將每張原始影像裁切成 8x8 共 64 張子圖像後再進行後續處理，如圖 5-7 所示。

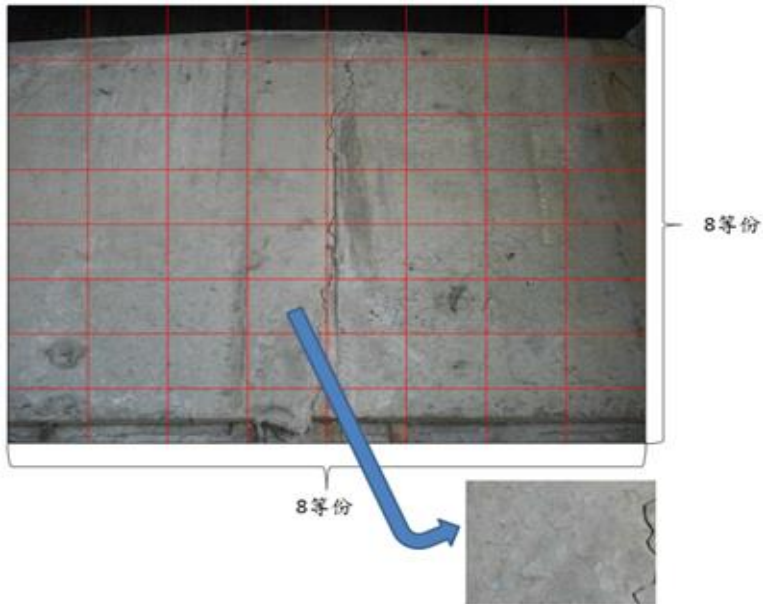


圖 5-7 原始影像裁切示意圖

此次訓練資料使用 4,645 張原始影像，將標記影像裁切過後為 297,280 張子圖像，其中子圖像標記為裂縫處以白色顯示，如圖 5-8 所示，子圖像包含到標記的裂縫圖像為少數，因此會去除掉沒有裂縫的子圖像，僅保留含裂縫子圖像進行深度學習訓練。

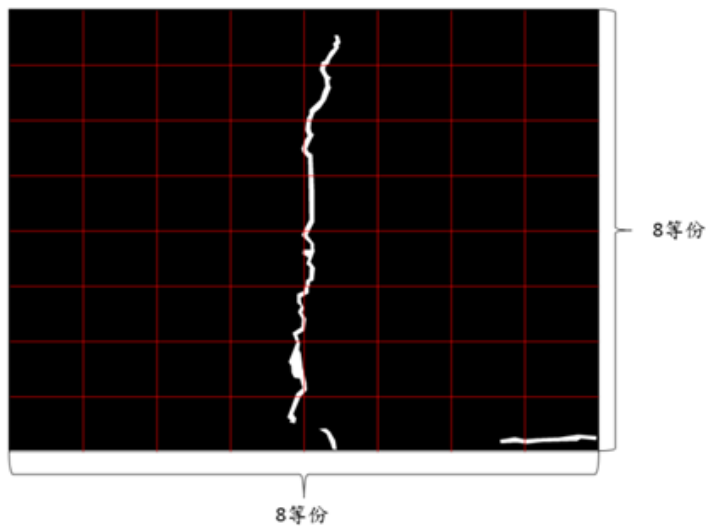


圖 5-8 訓練裂縫影像示意圖

5.4 AI 自動偵測裂縫成果

為驗證 AI 自動偵測裂縫之可行性，本次裂縫偵測樣本分別使用手持市售數位相機及無人機(UAV)空拍進行影像擷取，探討使用者利用手持相機拍攝與無人機在飛行中拍攝兩種狀態下，拍攝成果是否皆能讓電腦成功偵測裂縫位置。

為探討 AI 自動偵測裂縫技術實際偵測裂縫範圍比例，本次模型評價指標選用召回比率(Recall Rate)來表示偵測結果。

$$\text{召回比率(Recall rate)} = \frac{\text{真陽性(True positive)}}{\text{陽性狀況(Condition positive)}} = \frac{TP}{TP + FN}$$

真陽性(Ture Positive, TP)表示人工標記之裂縫範圍確實被電腦 AI 預測到之區塊；偽陰性(False Negative, FN)：表示人工標記之裂縫範圍未被電腦 AI 預測到之區塊。

一、手持攝影 AI 偵測成果

本次手持數位相機實驗使用 Sony HX90V 相機針對 10 組裂縫樣本進行影像擷取，相機細部規格詳表 5-1，電腦 AI 自動偵測裂縫成果如圖 5-9~5-10 所示。

表 5-1 Sony HX90V 細部規格

	重量	245 g (含電池和儲存媒體)
	感光元件規格	1/2.3 型 (7.82mm)
	像素 (有效)	1,820 萬像素
	鏡頭類型	ZEISS Vario Sonnar® T*
	焦距	4.1-123 mm
	F 值 (最大光圈)	F3.5 (廣角端) - 6.4 (望遠端)

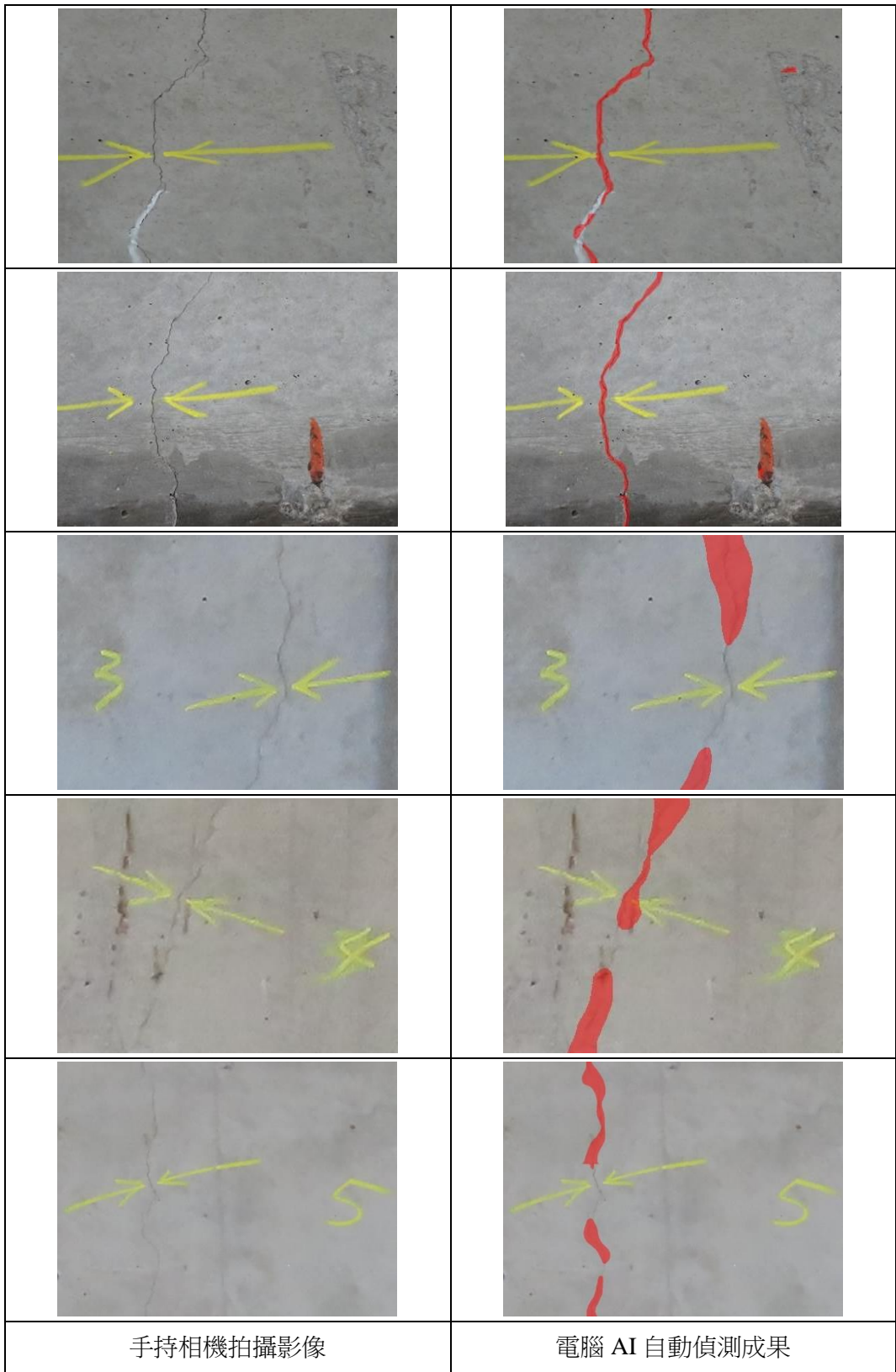


圖 5-9 手持相機攝影電腦偵測裂縫成果(1/2)

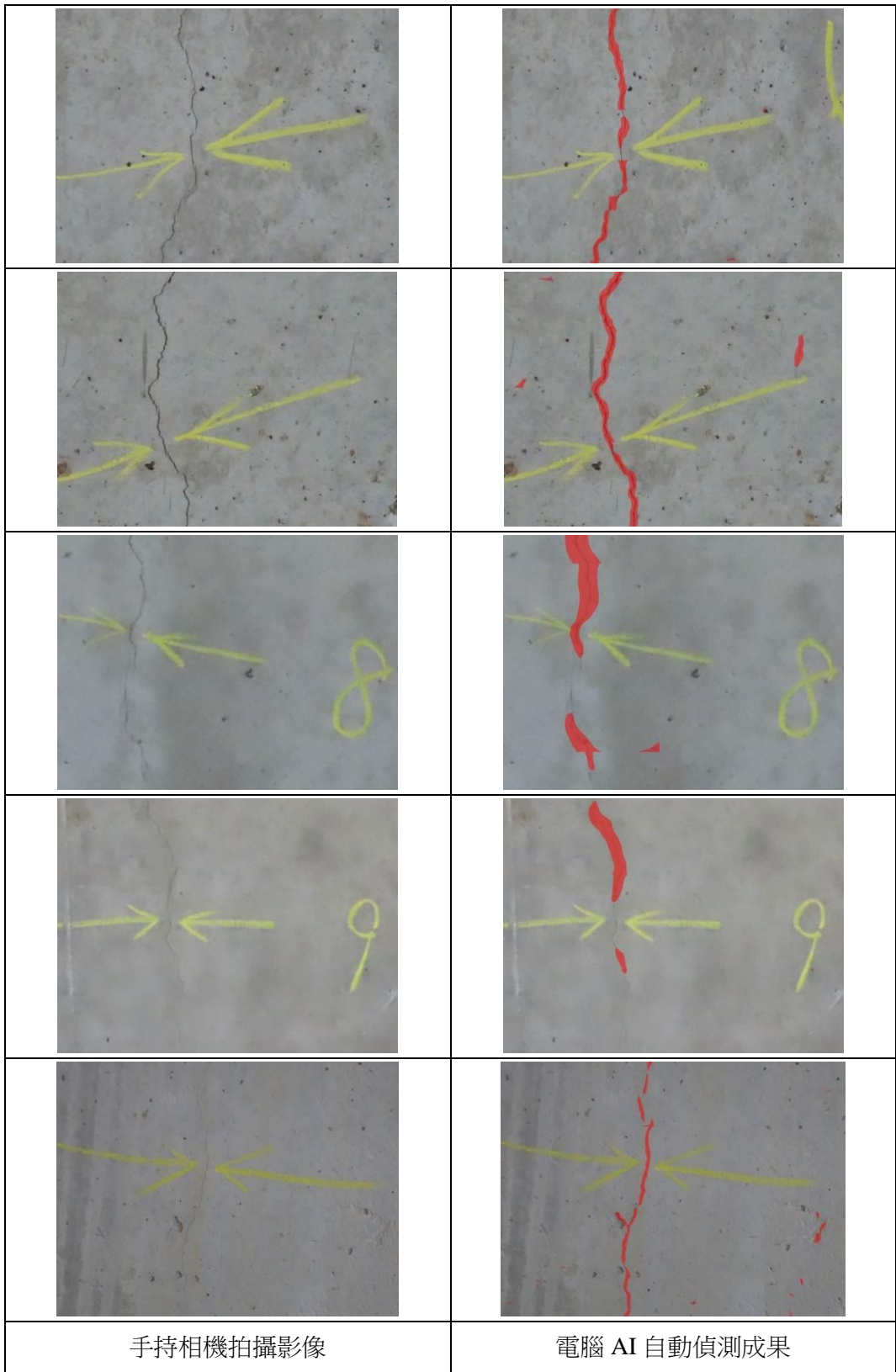


圖 5-10 手持相機攝影電腦偵測裂縫成果(2/2)

手持相機拍攝偵測成果評價如表 5-2 所示，其中 3、4、5 裂縫樣本的 Recall Rate 較低，可能原因為橋檢人員拍攝裂縫影像時距待測物過遠，或鏡頭放大倍率不足，使裂縫於整體影像中過於細微，導致電腦 AI 自動偵測 Recall Rate 過低。未來應透過制定拍攝影像 SOP 針對影像解析度、拍攝距離及拍攝涵蓋範圍等加以規範，使裂縫拍攝影像尺度相近，進而提升電腦自動偵測裂縫之準確度。

表 5-2 手持相機拍攝電腦自動偵測裂縫成果評價

編號	TP (pixel)	FN (pixel)	Recall rate
1	54,458	3,804	93.47%
2	76,145	3,479	95.63%
3	24,567	37,528	39.57%
4	64,334	110,108	36.88%
5	26,107	21,517	54.82%
6	34,843	3,902	89.93%
7	41,009	2,088	95.16%
8	25,547	7,869	76.45%
9	8,840	9,747	47.56%
10	23,066	1,729	93.03%
Avg			72.25%

註：TP：該預測出且確實預測到之區塊；FN：該預測出卻沒有預測到之區塊；Recall Rate = TP / (TP+FN)

二、無人機攝影 AI 偵測成果

無人機拍攝裂縫樣本作業於橋梁下方進行，由操作人操控無人機至適當距離擷取影像，如圖 5-11 所示。本次使用空拍機針對 10 組裂縫樣本進行影像擷取，無人機細部規格詳表 5-3，電腦 AI 自動偵測裂縫成果如圖 5-12~5-13 所示。



圖 5-11 無人機裂縫拍攝作業

表 5-3 無人機細部規格

	機身重量	907g (含電池)
	機身尺寸	322 x 242 x 84 mm
	抗風等級	5 級風 (8~10.7m/s)
	最長懸停時間	29 min
	感光元件	1" CMOS
	像素(有效)	2,000 萬像素
	等效焦距	28 mm

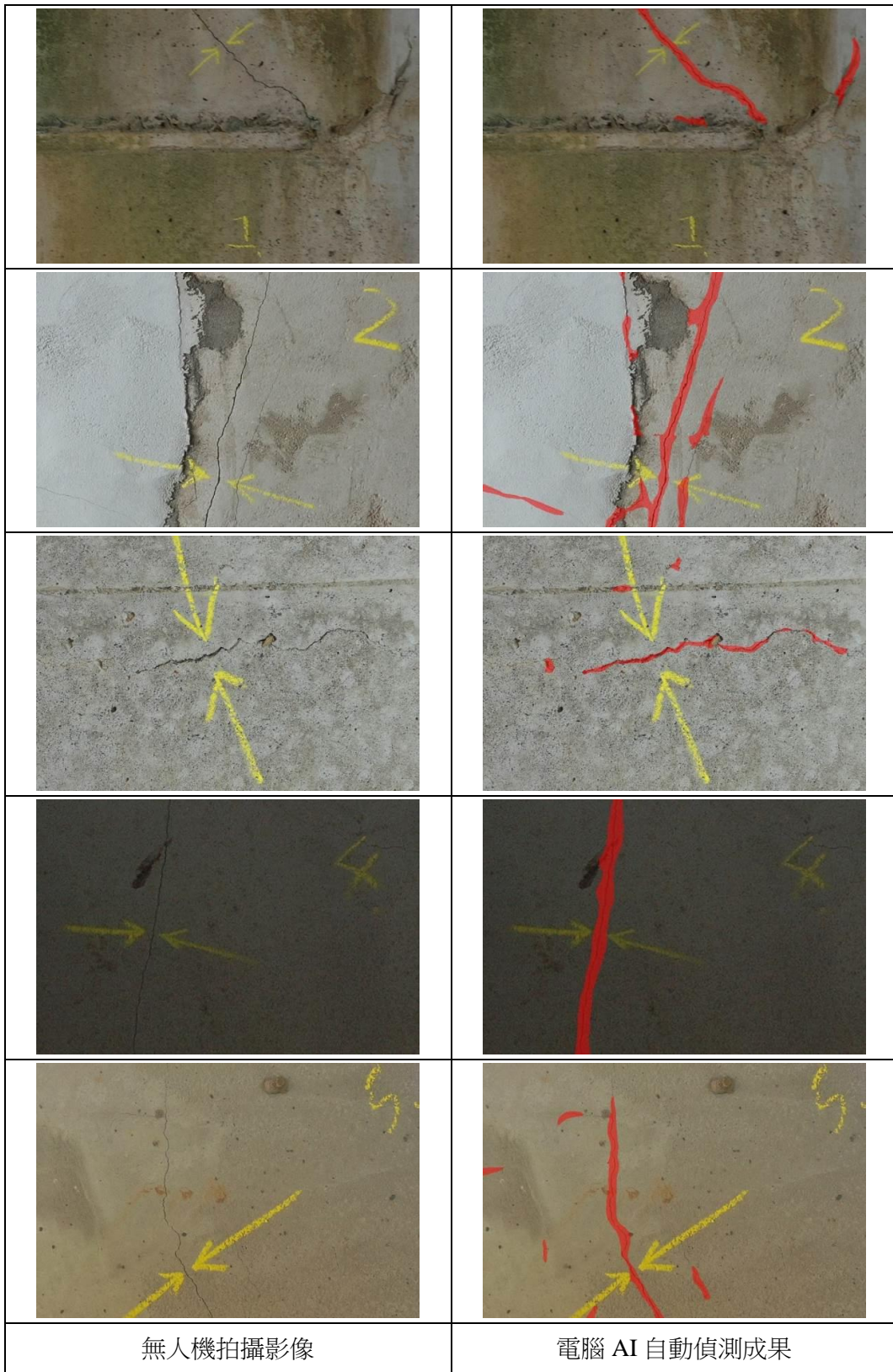


圖 5-12 無人機攝影電腦偵測裂縫成果(1/2)

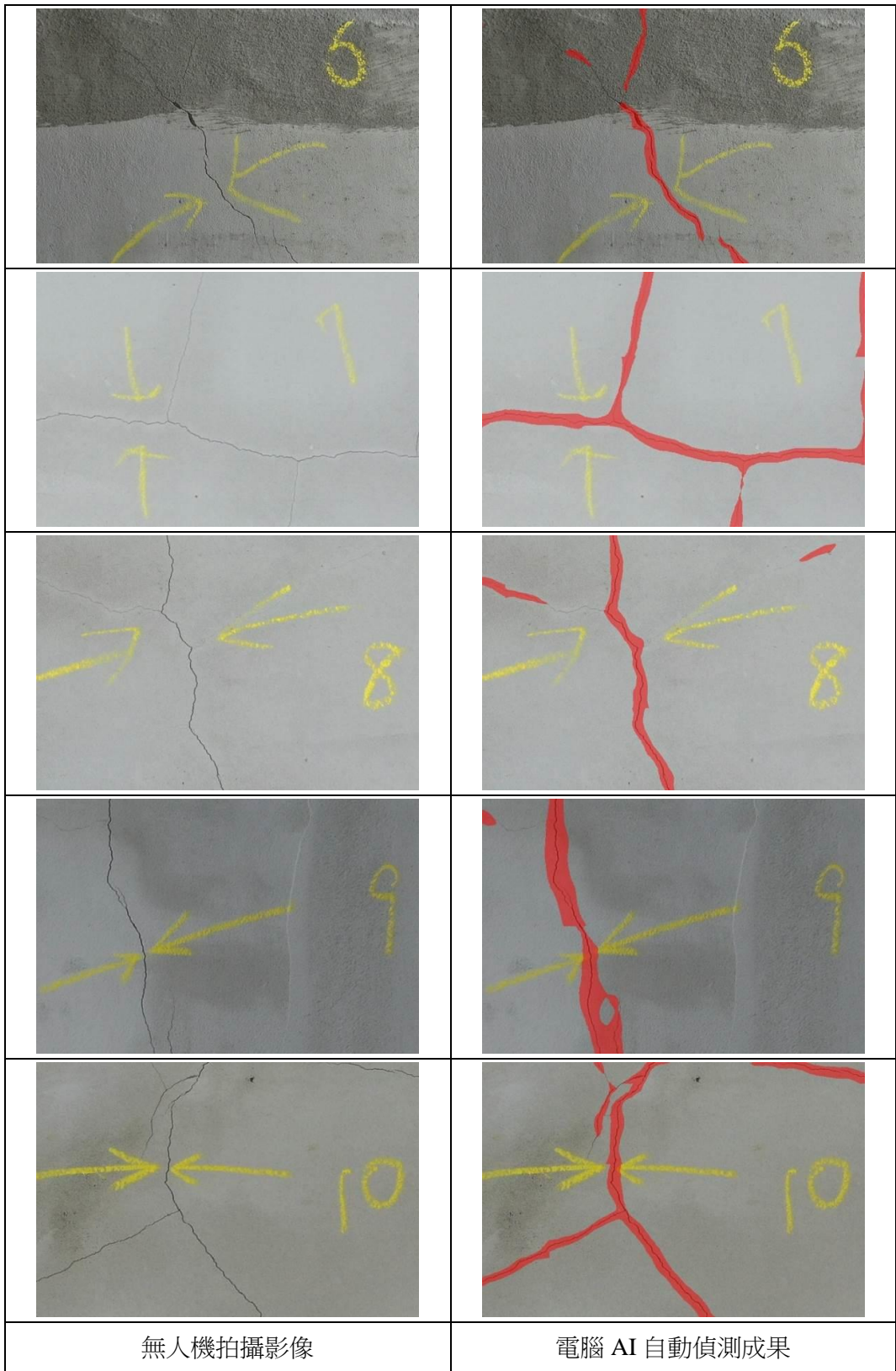


圖 5-13 無人機攝影電腦偵測裂縫成果(2/2)

從無人機空拍影像偵測成果中可發現主要裂縫皆被正確偵測出來，僅少數較不明顯之裂縫未被電腦偵測。無人機拍攝電腦偵測成果評價如表 5-4 所示，空拍影像偵測成果 Recall Rate 平均為 80.78%，優於手持相機拍攝成果平均 72.25%，主要係因無人機可不受地形及橋梁尺寸影響，相較於地面手持相機拍攝可取得更好的拍攝角度及距離。

表 5-4 無人機攝影電腦自動偵測裂縫成果評價

編號	TP (pixel)	FN (pixel)	Recall rate
1	24,418	11,521	67.94%
2	98,963	38,760	71.86%
3	28,273	11,764	70.62%
4	68,936	9,269	88.15%
5	78,182	4,796	94.22%
6	102,334	41,144	71.32%
7	271,256	44,249	85.98%
8	728,153	205,874	77.96%
9	154,796	14,642	91.36%
10	127,773	16,815	88.37%
Avg			80.78%

註：TP：該預測出且確實預測到之區塊；FN：該預測出卻沒有預測到之區塊；Recall Rate = TP / (TP+FN)

從上述成果可知利用無人機進行電腦 AI 自動偵測裂縫有其可行性，透過無人機可有效輔助目視檢測作業不足之處，亦可保障橋檢人員人身安全。無人機雖可無視地形限制靠近構件拍攝，作業時仍須考慮現地環境淨空是否足夠、風速及氣候是否適合飛行及空間定位精準度等因素，才可確保拍攝影像品質一致，避免影響偵測結果。

陸、結論

為解決部分橋梁構件橋檢人員不易接近檢測之困難，本文開發三維取像設備及非接觸式量測 APP，三維取像設備經室內校正率定後進行場域驗證，確認於橋址環境量測橋梁劣化具可信度，透過設備拍攝之影像記錄可同時保有裂縫長度寬度資訊，並可供追蹤日後劣化構件歷程。非接觸式量測技術可避免橋檢人員利用裂縫尺量測之人眼判釋誤差，惟 APP 程式目前須由橋檢人員手動進行夾擠量測，透過電腦計算裂縫長度寬度，應持續研發電腦自動量測技術，透過 AI 自動偵測裂縫範圍後進行量測，減少人為操作介入影響量測精度。

本文亦研發電腦 AI 自動偵測裂縫技術，以混凝土裂縫為例，先完成 4,645 張裂縫標記資料，總訓練影像達 297,280 張，樣本來源除利用手持數位相機蒐集外，亦嘗試利用無人機空拍擷取橋梁裂縫影像，經由深度影像學習技術成功由電腦 AI 自動偵測裂縫。

電腦 AI 自動偵測裂縫成果於手持攝影及空拍影像皆取得不錯的成果，其中手持相機拍攝平均 Recall Rate 為 72.25%，無人機空拍影像平均 Recall Rate 更高達 80.78%。未來將持續蒐集劣化樣本擴增訓練影像資料庫，並透過制定拍攝影像 SOP 針對影像解析度、拍攝距離及拍攝涵蓋範圍等加以規範，使蒐集樣本拍攝影像尺度相近，進而提升電腦 AI 自動偵測裂縫之準確度。

隨著科技發展進步，高解析影像設備體積逐漸微型化，將可望於無人機上裝載具高精度測距儀之攝影機，搭配電腦 AI 自動偵測技術，橋檢人員僅須依照橋址環境編寫航線，即可利用無人機以錄影或拍照方式迅速完成橋梁初檢。電腦 AI 將自動偵測影像中劣化範圍及位置，並可協助判釋裂縫為細微、明顯或嚴重裂縫，劣化程度較嚴重者可優先派遣橋檢車或高空作業車輔助橋檢人員進行近距離詳細檢測，若地勢險峻無法到達亦可於電腦上量測劣化範圍。將橋梁檢測導入電腦 AI 科技可精進橋檢人員作業效率及提升作業品質，未來亦將逐漸取代傳統人力邁向智慧橋檢時代。

參考文獻

1. 交通部(2019)，公路養護手冊。
2. 交通部(2020)，公路橋梁檢測及補強規範。
3. 交通部公路總局第二區養護工程處(2018)，107 年度本處苗栗、彰化、谷關及信義段省道橋梁目視 DERU 檢測評估工作(二代 TBMS)汛期前橋檢總評估報告書。
4. 交通部公路總局第二區養護工程處 (2019)，高解析度影像拍攝裂縫寬度。
5. Li, D., & Wang, X. ,2019. The Future Application of Transmission Line Automatic Monitoring and Deep Learning Technology Based on Vision. In 2019 IEEE 4th

International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (IC-CCBDA) (pp. 131-137). IEEE.

6. Smolyanskiy, N., & Gonzalez-Franco, M. ,2017. Stereoscopic first person view system for drone navigation. *Frontiers in Robotics and AI*, 4,11.
7. Chakravarty, P., Kelchtermans, K., Roussel, T., Wellens, S., Tuytelaars, T., & Van Eycken, L. ,2017. CNN-based single image obstacle avoidance on a quadrotor. In *Robotics and Automation (ICRA), 2017 IEEE International Conference on* (pp. 6369-6374). IEEE.

公路防災預警機制—智慧防災

李順成¹、林文雄²、陳國正³、張立群⁴

摘要

因應氣候變遷，在既有防救災工具與應變計畫，已難以應處極端氣候所導致劇烈災情，公路總局因應全球性氣候暖化變遷議題，近10餘年來逐步調適公路防災預警機制，將防災於導入流域、風險、UAV等技研管理，進階演進藉由自動偵測環境變化、整合資訊後傳遞的智慧防災預警機制，透過預警機制之建置，將山區易致災公路崩塌機率與落石資訊產製為風險訊息即時傳遞用路人使之避災離災。

關鍵字：智慧防災、崩塌機率、風險訊息、避災離災

壹、前言

台 9 線蘇花公路為臺灣東部瀕環太平洋臨海道路，為連繫宜蘭縣、花蓮縣主要道路，於太平洋生成影響臺灣之路徑颱風，在無任何天然地理條件屏障下，蘇花公路首當其衝遭受強風及豪雨正面侵襲，復因颱風觸陸後受中央山脈阻隔產生地形環境效應之風雨渦流，加大風雨強度所造成之道路災情。蘇花公路臨海鑿岩闢建，沿線多懸崖絕壁，地勢相當險峻，邊坡長期面臨風化侵蝕、剝落，復受颱風、豪雨、地震崩塌阻斷，影響用路安全。源自早期的蘇花軌道版單線道路，如圖 1 所示，歷經長期次第進行狹彎彎道改善、道路拓建與危害潛勢位址整建，迄至 1990 年完成蘇花全線雙向車道拓建及漢本、和仁、仁清、和清、大清水、13 號、錦文、清水、崇德等隧道拓建與新建，並於 79 年 10 月 25 日正式解除蘇花公路管制站之單向輪放行車管制，至此大幅提昇東部花蓮對外交通之樞紐。惟依山傍海闢建且位處地震帶之蘇花公路，在地理條件與自然環境環峙下，落石坍方潛勢危害風險無可迴避，因應風險因子、防災管理也隨之時代與時俱進，

¹ 交通部公路總局第四區養護工程處 處長

² 交通部公路總局第四區養護工程處 副處長

³ 交通部公路總局第四區養護工程處交通管理及控制中心 主任

⁴ 交通部公路總局第四區養護工程處交通管理及控制中心 防災分組長

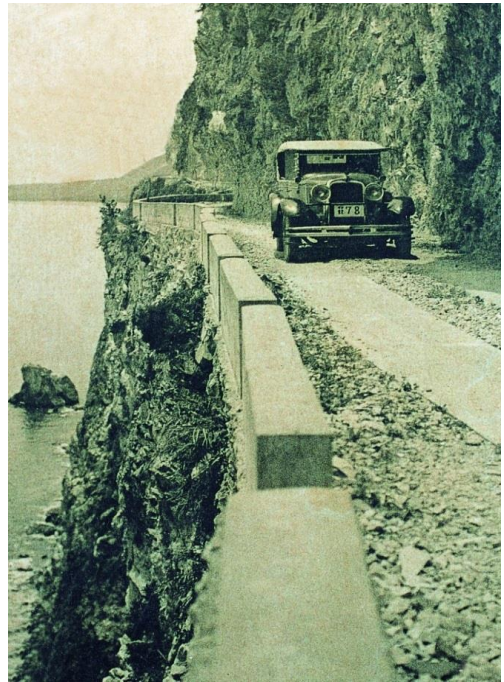
自早期年代隨機應變、演進為預約搶災開口契約，預置機具進駐、及至客製化氣象預報分析、防災應變盤點整備、公路防災預警機制應運而生。



胼手百鍊筆路藍縷



鎬釜千錘巧奪天工



公路軌道單線路徑

圖 1 蘇花公路早期

照片來源：四工處 70 週年專刊

貳、公路防災預警機制

2.1 機制歷程

97 年 9 月 14 日強烈颱風辛樂克在中臺灣降下超大豪雨，大甲溪溪水迅速暴漲，晚間 19 時后豐大橋先行封閉往豐原方向橋梁，往后里方向橋梁在未及封閉前，橋墩突然傾斜致約 40 公尺長橋面塌落，3 部車輛隨之斷橋墜入湍急大甲溪中，落橋造成 2 死、4 失蹤災情事件。經此事件公路總局審慎研訂封橋標準作業程序。

99 年 10 月 21 日梅姬颱風外圍環流與東北季風共伴效應，宜蘭縣蘇澳氣象站累積降下 1018mm/24h 雨量、時雨量並連續四小時達百毫米以上，一度上達 181.5mm/hr 強降雨（如表 1 所示），瞬時造成蘇澳地區淹水盈尺災情，第四區養護工程處坐落位址前方鐵路均受積水淹沒汪洋一片，如圖 2 所示；台 9 線蘇花公路蘇澳-東澳路段沿線邊坡崩坍、路基流失之嚴重災情，造成行經該路段約 30 部車輛、逾 500 人一度受困，此一事件導致臺灣與大陸來臺觀光旅客共 26 人失蹤罹災，為臺灣近年因颱風強降雨所衍生最嚴重之災情。

后豐大橋及蘇花公路梅姬風災事件後，公路總局開啟「公路防災預警機制」，訂定封橋封路標準作業程序；後續並推展單一降雨指標，律定「預警、警戒、行動」多重降雨指標，讓防救災應變有所行動基準（如表 2 所示）；後於 102 年再發展為多重降雨指標，使道路預警及封閉管制更精進；103 年復應用單點實際雨量及雨網格模擬推估演算至面的雨量值，建立全時高風險路段自動預警系統。並由中央氣象局為公路總局建置客製化「劇烈天氣監測系統（QPESUMS）」，如圖 3 所示，其系統產出公路總局轄管全區路線一二級監控路段、浪襲監控路段、即時雨量值等地理水文氣象資訊，能完整提供公路總局所屬養護管理單位即時掌握天然氣候防災預判部署整備管理上關鍵能量之需求。

另蘇花改路線於 109 年 1 月 6 日全線開放通車後，舊蘇花公路（台 9 丁線）與蘇花改道路（台 9 線）構合成為蘇花路廊，公路總局第四區養護工程處因此進階研訂「蘇花路廊防災管理機制」，如圖 4 所示，俾使路廊養護單位防災管理與用路人快速辨識替代路線路網資訊。



圖 2 第四區養護工程處前方鐵公路淹沒

表 1 臺灣地區時點降雨量排序

(臺灣南區氣象中心、本局所屬氣象站、本局所屬自動雨量及氣象站資料)

排序	站名	測站站碼	降水量(mm)	發生日期	影響天氣系統
1	澎湖	467350	189.8	1974/07/06	西南氣流
2	彭佳嶼	466950	186	2002/07/10	娜克莉颱風
3	佳冬	C0R540	183.0	2017/07/29	尼莎颱風
4	蘇澳	467060	181.5	2010/10/21	梅姬颱風及東北季風
5	新埤	C0R550	168.0	2017/07/29	尼莎颱風
6	新城	C0T840	167.5	2005/10/02	龍王颱風
7	恆春	46759	167.5	2012/08/24	天秤颱風
8	墾丁	C0R36	166.5	2012/08/24	天秤颱風
9	月眉	C1V260	165.5	2002/03/26	鋒面
10	彭佳嶼	466950	164.0	2002/07/10	娜克莉颱風

表 2 多重降雨指標行動基準

一、二級 監控 路段	座落 行政區	實際 參考 雨量站	預警值					警戒值			行動值					說明
			10 分鐘 雨量 mm	邏 輯 值	時 雨 量 mm/hr	邏 輯 值	24 小時 累積 雨量 mm	1 小時 雨量 mm/hr	邏 輯 值	24 小時 累積 雨量 mm	時 雨 量 mm/hr	邏 輯 值	3 小時 累積 雨量 mm	邏 輯 值	24 小時 累積 雨量 mm	
臺9丁 線 2K-16K 蘇澳-東 澳	宜蘭縣 蘇澳鎮	東澳嶺 雨量站	10	OR	40	OR	130	50	OR	200	80					
											50	AND	150			
											50			AND	350	



圖 3 劇烈天氣監測系統 (QPE Plus)

蘇花路廊防災管理機制

路段別	台9線蘇花改高架路段 (金岳工務段)	台9丁線+台9線共線路段 (南澳工務段)
累積降雨量 行動值	不實施封路	道路管制封閉-指標雨量 1小時 80 mm 3小時 150 mm 24小時 350 mm
颱風風速 管理值	平均風速 ≥ 8級暴風半徑：發布行車降速30km/hr 平均風速 ≥ 10級暴風半徑：啟動道路管制封閉	平均風速 ≥ 7級暴風半徑：只出不進 平均風速 ≥ 8級暴風半徑：啟動道路管制封閉
風險管理	「台9丁線+台9線共線」路段於達到風速管理值時(風速≥8級)將實施道路封閉，同時台9線蘇花改高架路段亦生成強風風險，因此不啟動機車改道台9線蘇花改疏導措施	



圖 4 蘇花路廊防災管理機制

2-2 機制策進

公路防救災核心運作，運用公路防救災資訊系統及中央氣象局客製化「劇烈天氣監測系統（QPESUMS）」鏈結專屬天氣分析專業團隊研析轄區氣象情資匯報，並由水情監控人員實施 24 小時嚴密監控，全時提供公路管養單位啟動預防性應處決策。因此從被動搶災，到應用科學資料觀測，結合重點監控路段/橋梁「公路風險管理」思維基礎，循依「預判、部署、通告、預警、應變」之公路防災預警步驟，如圖 5 所示。

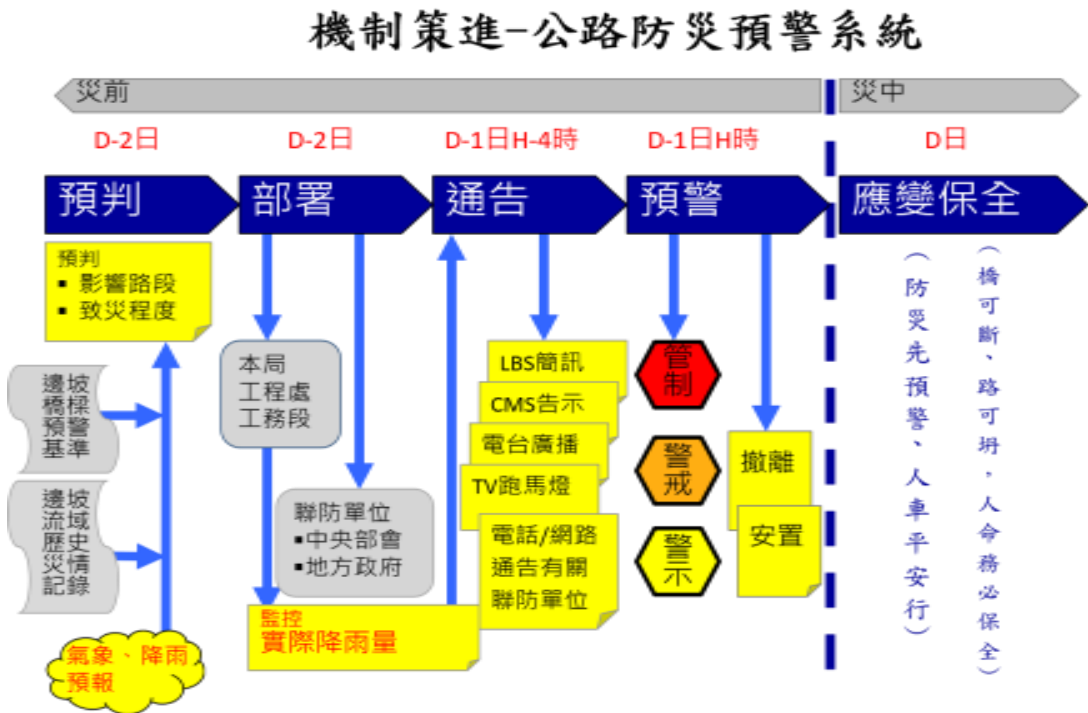


圖 5 公路防災預警部署排程

2-3 兵棋推演

災害應變秉持禦敵從寬、料敵從嚴，而突如其來災害情境憑藉有條不紊臨危應處，為檢視驗證防災指揮體系應變決策及實績流程，公路總局自 103 年起於汛期前對各區養護工程處實施「天然災害兵棋推演考評」，實施方式採三階段無腳本推演，各階段經隨機抽籤選定「指揮官+應變小組」成員，並實施地震、颱風、核災、海嘯及淹水泥流等多項複合型主軸情境及下達臨時狀況子題進行限時模擬推演，整體兵棋推演，於災前氣象情資分析匯報、決策預警訊息 D-day 時序排程、整備部署策略；於災中監控降雨熱區滾動分析、應變處置、鄰近單位聯防支援與公路管制封閉決策。

兵棋推演旨在檢視各層級防救災指揮官，於天然災害發生能嫻熟各種決策資源與要領，俾於各階段瞬變情境中能自主運籌帷幄下達指揮決策指令，遂行預判、部署、通告、預警及應變等防救災應變作業；也同時謀合確認與應變小組幕僚間提綱契領作業能力，

完善盤點人事時地物資源與風險，以臻強認知「為指而參」應變團隊效能。

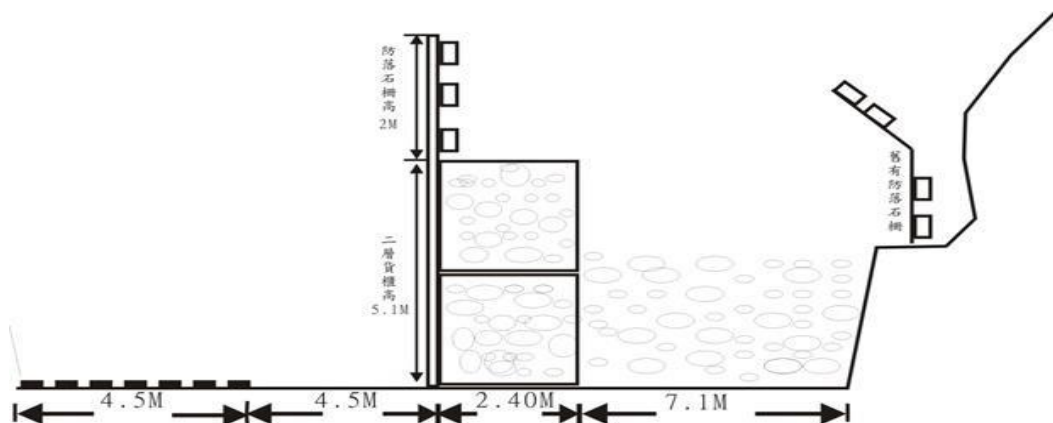
參、搶災案例與管理運作

3-1 蘇花公路搶災案例

民國 106 年 5 月 28 日端午節連續假期，當日 19 時位台 9 線 112k+600（地名：九宮里；蘇花改通車後路線重新編定調整，目前路線里程為台 9 丁線 9k+800）肇生持續性坍方落石道路阻斷，至 5 月 29 日 UAV 空拍崩坍災況及比對歷史災情，判識地質岩性以大理岩為主，因大理岩易受雨水、海風侵蝕，致崖頂稜線張力裂縫肇行抽坍，且因長期受海風吹襲致岩塊風化剝離坍落，向源抽坍高達 185m，高邊坡落石經裸坡滾動彈跳至路面高約 3~5 公尺，邊坡岩塊持續性剝離坍落顯現難有短期歇坍之勢，由於本路段為宜花地區主要聯絡道路，且適逢端午連假，第四區養護工程處即啟動東部蘇花段陸路運輸中斷之疏運應變方案，並協請鐵路局加開班次、航港局啟動蘇澳港-花蓮港海運疏運措施，順利啟動多元交通疏導。然陸路替代路線與鐵路、海運疏運乃屬緊急應處措施，儘速恢復災點通行方能解決宜花運輸根本需求；第四區養護工程處經判識災點路幅條件及落石頻率每分鐘達 2~4 次之無停歇現象，決策採行貨櫃防落石牆工法，如圖 6-1 所示，經戮力搶修於 106 年 6 月 12 日完成高 H=5.2m 二層貨櫃堆疊及貨櫃頂部組架高 H=3m 防落石攔截柵，如圖 6-2 所示，在確認彈跳落石已可攔截防護條件下，翌日（6 月 13 日）開始進行災點邊坡刷坡搶修作業，並於 106 年 6 21 日完成搶修，解除每日搶修施工管制、恢復雙向正常通行。因應本阻斷事件突發性風險，讓筆者又再次歷練山區道路防災管理策略之多面向探討。



圖 6-1 貨櫃工法防落石牆構築照片



台9線112.6K貨櫃工法橫斷面示意圖



圖 6-2 貨櫃防落石牆完成照片
(H=5.2m 二層貨櫃+ H=3m 防落石柵)

3-2 山區道路防災管理策略

山區道路蜿蜒穿越自然天成山高峽谷，氣象萬千美麗景緻中，潛藏上下邊坡坡面浮石、逕流沖刷、伏流滑動、曲流側刷、動物擾動、參木搖擺、人為開發等場域特性，加諸天然季候降雨、颱風、地震滋擾，藉由擬定山區道路防災管理方針，如圖 7 所示，以降低道路風險並提昇用路安全，其管理面向在於平時減災、災時避災、災中應變：

- 平時減災措施：結構性減災措施、非結構性減災措施
 - A. 結構性減災措施：邊坡改善、防落石攔截網、明隧道等建構措施。
 - B. 非結構性減災措施：導入科技巡檢及落石防治管理等預防性養護對策。
- 災時避災作為：緊急避護場所、智慧防災告警
 - A. 緊急避護場所：闢設緊急安全停駐空間。
 - B. 智慧防災告警：經由高風險告警訊息的傳遞，提供用路人自主避災離災。
- 災中應變處置：公路防災預警應變機制
 - 公路防災預警應變機制：劇烈天候來臨前，透過機制進行公路預警性封路。

山區道路災害管理策略



圖 7 山區道路防災管理策略

3-3 智慧防災

公路總局累積實務經驗不斷精進下，漸次導入「防災預警管理」觀念，應用「智慧化技術」構築自動化、即時性的智慧防災系統，包括即時預測、攔截告警、遙感探測與數據比對等技術設備，建構區外用路人獲知風險告警訊息、區內用路人告警避災、養護單位遠端監控即時應處機制等科技及防災預警網絡運用，型塑山區道路四道防線風險管理概念，期以提升風險潛勢預警、告警與系統攔截盤查等重層守護。

【第一道防線】：風險預警推播系統

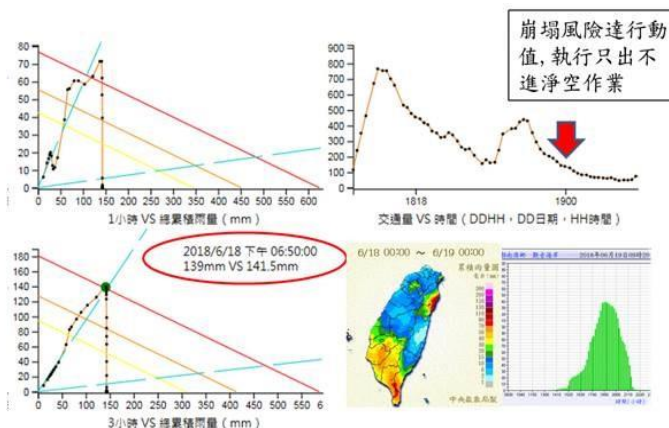
蒐集蘇花公路歷史災情、比對落石成因與雨量值，如圖 8-1 所示，以邏輯式迴歸方法建立公路崩塌機率數值模型（資料引用附錄/一、參考文獻 5），透過特徵雨量站回傳雨量數據輸入該模型，即可自動運算該場域當下崩塌機率值，如圖 8-2 所示，當達到高崩塌機率潛勢時，風險預警推播系統將自動發送 CBS 簡訊廣播及幸福公路 APP 訊息，如圖 8-3、8-4 所示，提示用路人非必要勿進入風險路段（警戒區）之警訊，將風險預警資訊廣泛傳遞區外用路人判識危害，冀以阻隔用路人避災於區外；而道路養護單位亦同時接收風險訊息進行應變處置進駐搶災機具及研判預警性封路時機。



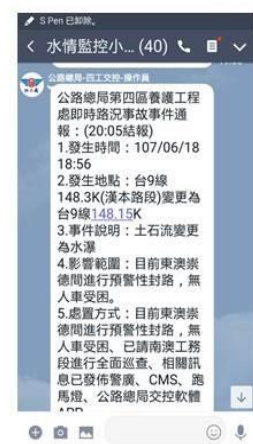
圖 8-1 GIS 支援決策資訊系統 (綠、黃、橙風險預警)

蘇花公路崩塌機率實務操作 案例驗證

2018年6月18日端午節19:00
蘇花公路無預警強降雨



警戒
層級
逐步
提升



水瀑
及零
星落
石產
生

圖 8-2 Bobe 系統崩塌機率比對圖表

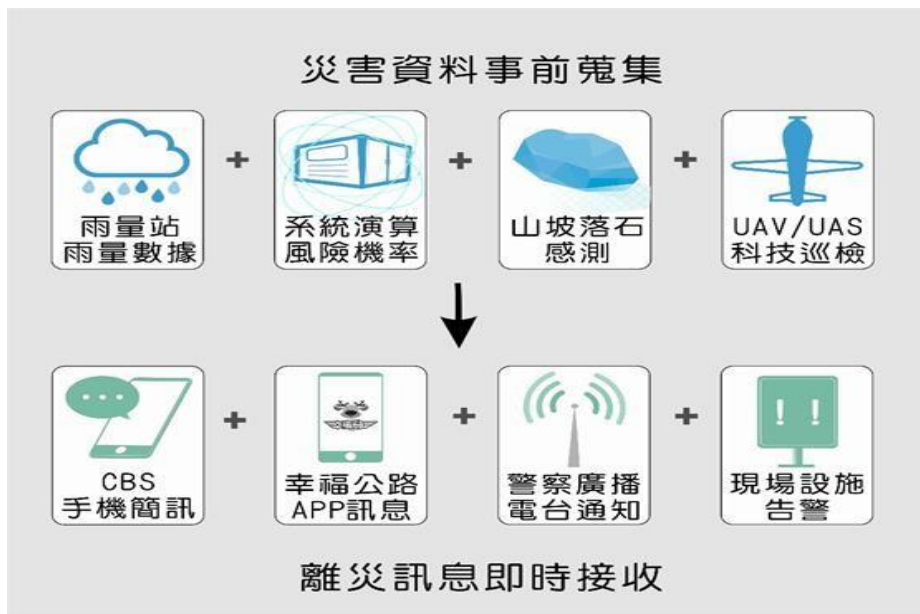


圖 8-3 科技及防災預警網絡運用



圖 8-4 科技及防災預警網絡運用

【第二道防線】：路側風險資訊顯示系統（RID）

在第一道防線啟動預警訊息推播時，系統訊息經由介接傳輸於通往風險路段（警戒區）區外各道路上之路側風險資訊顯示系統（RID），如圖 9-1、9-2 所示，同時連動燈箱顯示「黃色警示燈號+警戒」預警，燈箱下方附牌標誌預設「燈亮時 蘇澳至東澳降雨累積達警戒請勿進入」警語，提示區外用路人區域路段降雨風險預警訊息，以臻成阻隔用路人於區外，避離危害之風險。

路側風險資訊顯示系統牌面 (RID)



交控中心檢視 CMS 系統畫面

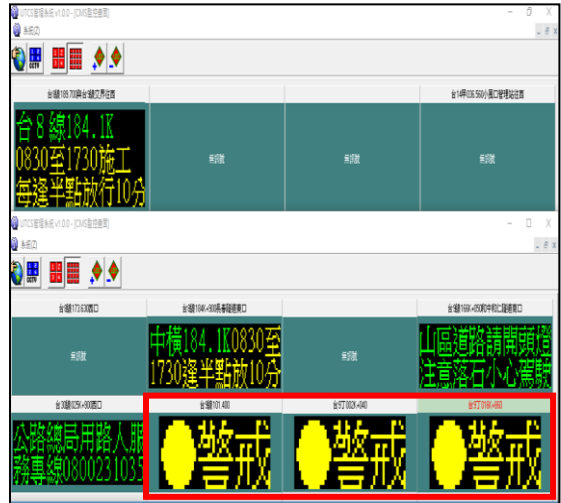


圖 9-1 第 2 道防線 路側風險資訊顯示系統



圖 9-2 第 2 道防線 路側風險資訊顯示系統 台 9 線 101.4K (蘇澳新站前)

【第三道防線】：落石告警系統 (台 9 丁線 9K+800 為例)

第三道防線-落石告警系統係選定高風險潛勢邊坡，並自邊坡上方階序裝置紅外線光柵偵測器、上層消能式防落石網+傾斜感知器、下層消能式防落石網+傾斜感知器、地音器...等偵測感知設備，將邊坡落石偵知訊息以系統傳輸至管理端察覺應處、同時連動至下方道路遠端警戒區警用路人避離、至近端落石區告警用路人迴避，整體架構環節由「邊坡防護暨感知告警設施」與「道路連動告警設施」連結建構，如圖 10-1、10-2、

10-3 所示。在高風險上邊坡設置攔石網及落石告警系統，當發生落石時，攔石網進行攔截與消能之作用，而落石震動纜線啟動告警系統，搭配現場蜂鳴器、警示燈號、LED 警示看板等提醒用路人即時避災，並將落石訊息以簡訊、Line 訊息推播至養護單位啟動搶災，如圖 10-4 所示。

第三道防線-台 9 丁線 9.8K 落石告警設施佈設平面圖



圖 10-1 落石告警系統

第三道防線-台 9 丁線 9.8K 落石告警設施佈設斷面圖

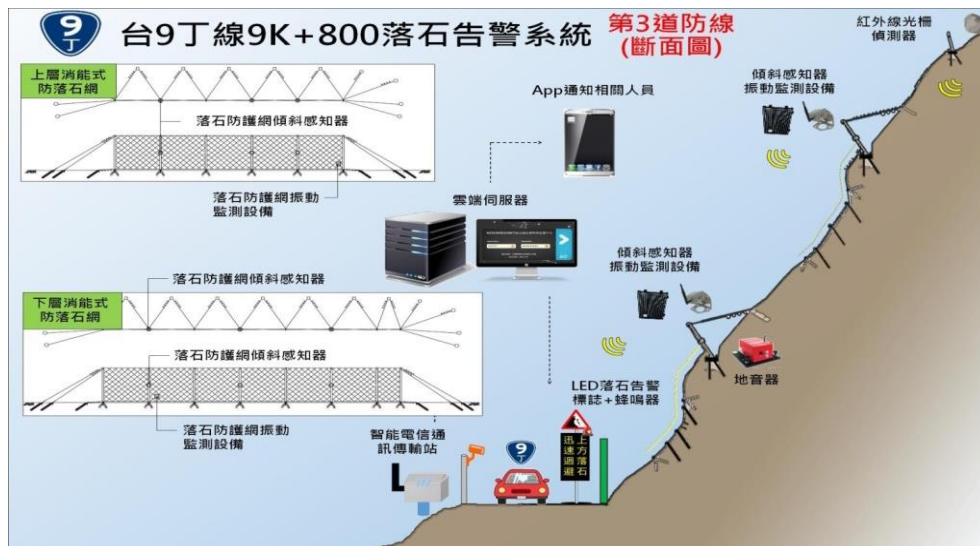


圖 10-2 落石告警系統

邊坡防護網：豎立式攔截網+簾幕式防護網



圖 10-3 落石告警系統



圖 10-4 落石告警系統

【第 4 道防線】：受困車輛偵測系統

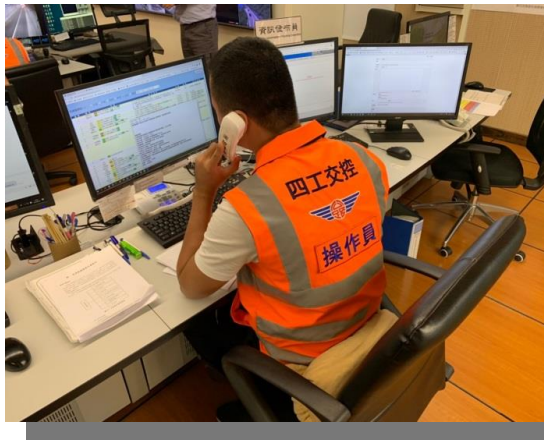
當山區道路因落石坍塌阻斷造成人車受困，或是有其他人車受困的可能性時，除派員至現場勘查確認外，啟動「受困車輛偵測系統」，即透過自動車牌辨識（AVI）與車輛偵測器（VD）的偵測與邏輯運算，如圖 10-5 所示，協助產出可能受困車輛清單以為進一步清查依據，如圖 10-6 所示，作為輔助搶救災人車受困查詢支援工具以爭取時效，進而保障用路人的生命財產安全。

自動車牌辨識系統 (AVI) + 車輛偵測器 (VD)



圖 10-5 車牌辨識系統(道路端)

通報監理站提供車牌資訊



多方通報啟動救災救援

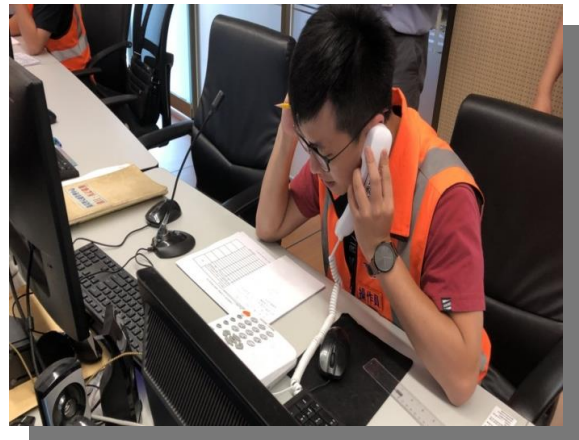


圖 10-6 車牌辨識系統 (交控中心端)

3-4 智慧防災整體運作

智慧防災四道防線整體架構，其第一道風險預警推播系統就是將歷史降雨數值與實際發生落石、坍方事件演算出崩塌風險機率，換言之就是一種「統計模式」的運用，而崩塌機率風險經由網路科技推播發布，可達成廣泛傳達予用路人預警風險之外溢效益；而第二道防線路側風險資訊顯示系統 (RID)，則是將第一道風險預警訊息經由網路傳輸至鄰近風險區域前方路線上之路側實體示警設施，將風險訊息進行第二道預警，以供

未及閱覽第一道推播訊息之車輛駕駛人，再度經由路側風險資訊 RID 察覺風險並作避災判斷。而瞬息驟變之邊坡落石則由第三道防線之建構讓已續進至災點路段之用路人能由路側落石告警牌面 LED 閃燈與蜂鳴器響音，使之警示攔截、迴避撤離之契機。第四道防線係在台 9 丁線蘇澳端與東澳端設置 AVI+VD 設備，當災情發生時，通過該區段之車輛數量及車籍經由交控中心人員於電腦系統中逐筆清查統計，並提供各聯防單位實施查詢與救護救援任務。為智慧防災四道防線軟硬體設施有效整合運作，將各階段模式產製為「智慧防災整體運作流程圖」，如圖 10-7 所示，提供相關人員瞭解設備與內外部整合運用。

智慧防災整體運作流程圖

(108.09.18 版)

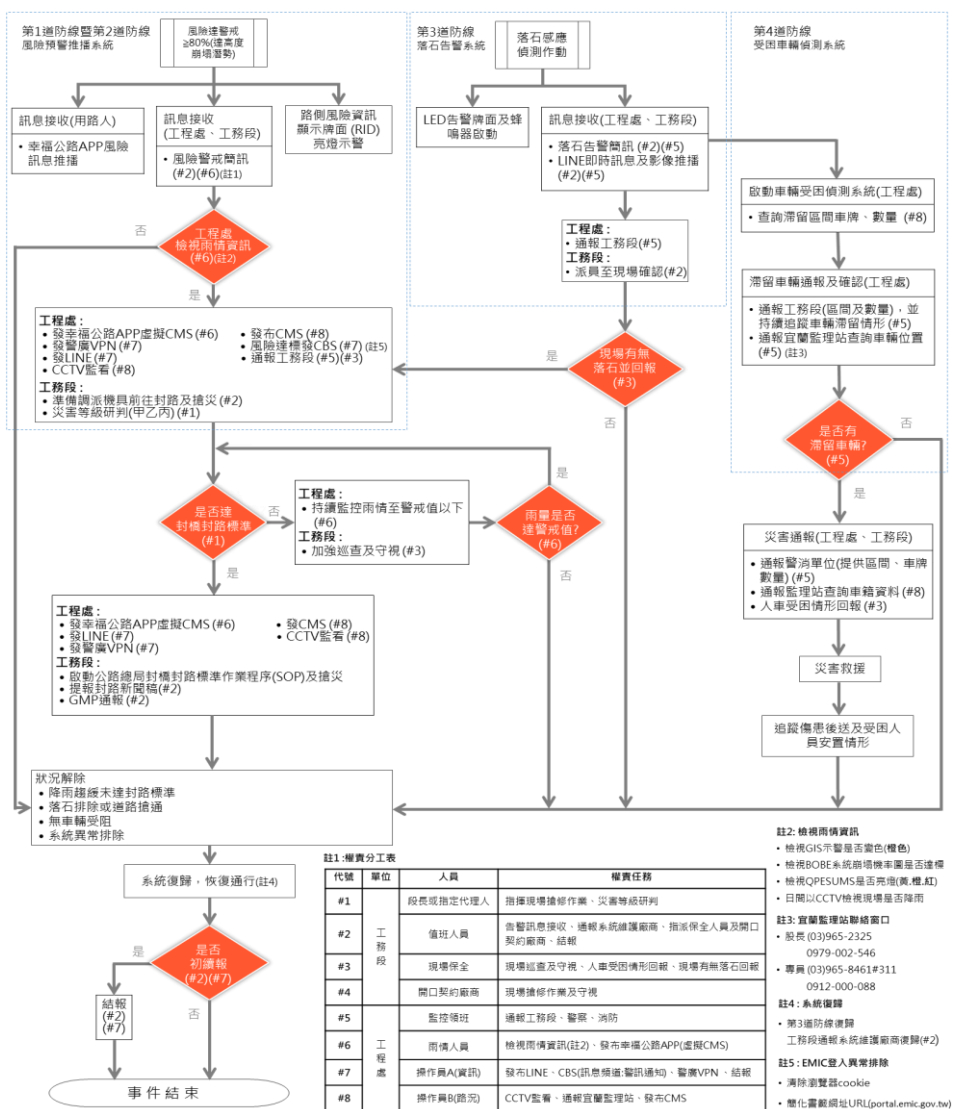


圖 10-7 智慧防災整體運作流程圖

肆、結語

公路防災預警機制，透過防災、救災、離災 3 個層次，導入科技資源產出精確數值，整合智慧科技與人本履歷，由實務驗證過程滾動精進，期簡化且周全之流程，以實踐「防災重於救災，離災重於防災」之目標。

氣候變遷巨災型態更形複合劇烈，災變天候頻率愈發多舛，形成東山飄雨西山晴之瞬變模態，交通部公路總局因應變遷情事，近年積極經由公私部門可運用評估與分析工具，透過歷史災害災情分析回饋進行災變風險評估，不斷精進研展具體性防救災應變機制與韌性治理策略，於平時進行脆弱點察覺改善-提高抗災力、降低災害破壞力；災時運用監控分析風險傳遞與控管-降低用路人暴露度（避災、離災）及減低災情傷害性，期使災變均能有效結合人因智慧與科技智慧之運作整合，以臻成化險為夷、勝以保全之行動指標。

〔附錄〕

一、參考文獻

1. 公路總局：108 年智慧防災第 1 期計畫-守護用路人的 4 道防線簡報。
2. 公路總局養路組公路防災中心：智慧防災相關推介簡報。
3. 公路總局第四區養護工程處：70 週年紀念專刊
4. 公路總局第四區養護工程處南澳工務段：蘇花公路 112.6K 致災因素及貨櫃防落石牆工法簡報，108 年金路獎優良景觀類參選路段影音。
5. 陳進發等人：2016.07.15 臺灣公路工程月刊第 42 卷第 7 期「山區公路因雨致災崩塌機率模式之建立及風險研析」

二、應用影音觀賞



影片 智慧防災・守護您【動畫篇】
<https://smarturl.it/3smartanimation>



影片 洞燭機先・公路防災預警機制
<https://smarturl.it/2insightandpreventio>



影片 智慧防災・四道防線【運作展示篇】
<https://smarturl.it/4smartandplanner>



影片 蘇花公路美麗與哀愁
<https://smarturl.it/1beautyandsad>

臺灣公路工程

出版者：臺灣公路工程月刊社

地 址：10863 臺北市萬華區東園街 65 號

電 話：(02)2307-0123 轉 8008

網 址：<http://www.thb.gov.tw/> 本局資訊 / 影音及出版品

編 者：臺灣公路工程編輯委員會

出版年月日：中華民國 110 年 3 月 15 日

創刊年月日：中華民國 41 年 11 月 11 日

刊期頻率：每月 15 日出刊

本期定價：新臺幣 30 元

展售處：

五南文化廣場

地 址：40042 臺中市中山路 6 號

電 話：(04)2226-0330

國家書店松江門市

地 址：10485 臺北市中山區松江路 209 號 1 樓

電 話：(02)2518-0207 (代表號)

國家網路書店：<http://www.govbook.com.tw>

三民書局

地 址：10045 臺北市重慶南路一段 61 號

電 話：(02)2361-7511

印刷者：社團法人中華民國領航弱勢族群創業暨就業發展協會

地 址：10859 臺北市萬華區西園路二段 261 巷 12 弄 44 號 1 樓

電 話：(02)2309-3138

中華民國 110 年 3 月初版一刷

GPN：2004100003

ISSN：1812-2868

著作財產權：交通部公路總局

本刊內容不代表本局意見，發表之文字如需轉載或引用
請先徵得本刊之同意。

(請洽臺灣公路工程月刊社，電話：(02)2307-0123 轉 8008)

半年新臺幣 150元
一年新臺幣 300元
軍人及學生半價優惠

訂閱匯款至中央銀行國庫局(代號0000022)
帳號(共14碼)：1 2 2 9 7 1 0 2 1 0 8 0 1 9
戶名：交通部公路總局其他雜項收入戶

ISSN 1812-2868



9 771812 286005

GPN200410003

定價新臺幣30元