無人機搭配 AI 影像辨識 應用於橋梁檢測之研究(1/2)-橋梁劣化構件 AI 影像辨識之技術開發



# 交通部運輸研究所

中華民國 112 年 4 月

# 無人機搭配 AI 影像辨識

應用於橋梁檢測之研究(1/2)-

橋梁劣化構件AI影像辨識之技術開發

著者:饒見有、林昭宏、劉光晏、李志清、賴威伸、 胡智超

# 交通部運輸研究所

中華民國 112 年4 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

無人機搭配 AI 影像辨識應用於橋梁檢測之研究.	
(1/2): 橋梁劣化構件 AI 影像辨識之技術開發/	
饒見有,林昭宏,劉光晏,李志清,賴威伸,胡	
智超著 初版 臺北市 : 交通部運輸研	
究所, 民 112.04	
面; 公分	
ISBN 978-986-531-490-3(平裝)	
1.CST: 交通管理 2.CST: 橋樑工程 3.CST: 檢	
驗 4.CST: 遙控飛機	
557.15029 112005661	

無人機搭配 AI 影像辨識應用於橋梁檢測之研究(1/2) -橋梁劣化構件 AI 影像辨識之技術開發 者:饒見有、林昭宏、劉光晏、李志清、賴威伸、胡智超 著 出版機關:交通部運輸研究所 地 址: 105004 臺北市松山區敦化北路 240 號 網 址:www.iot.gov.tw (中文版>數位典藏>本所出版品) 話:(02)2349-6789 電 出版年月:中華民國 112年4月 印刷者:全凱數位資訊有限公司 版(刷)次冊數:初版一刷 58冊 本書同時登載於交通部運輸研究所網站 定 價:300元 展售處: 交通部運輸研究所運輸資訊組·電話:(02)2349-6789 國家書店松江門市: 104472 臺北市中山區松江路 209 號•電話: (02)2518-0207 五南文化廣場: 400002臺中市中區中山路 6號•電話: (04)2226-0330

GPN:1011200382 ISBN:978-986-531-490-3(平裝) 著作財產權人:中華民國(代表機關:交通部運輸研究所) 本著作保留所有權利,欲利用本著作全部或部分內容者,須徵求交通部運輸研究所 書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱:無人機搭配 AI	影像辨识应用於橋梁檢	润之研究(1/2)-橋梁劣化相	構件 AI 影像辨
識之技術開發			
國際標準書號(或叢刊號)	政府出版品統一編號	運輸研究所出版品編號	計畫編號
ISBN978-986-531-490-3(平裝)	1011200382	112-033-2329	111-EDB006
本所主辦單位:運輸工程組	合作研究單位:國立成	成功大學	研究期間
主管:賴威伸	計畫主持人: 饒見有		自 111 年 03 月
計畫主持人:賴威伸	研究人員:林昭宏、劉	劉光晏、李志清、陳光宇	- 111 - 10 -
研究人員: 胡智超	地址:臺南市大學路	1號	全111年12月
聯絡電話:02-23496821	聯絡電話:02-275757	5	
傳真號碼:02-25450427			

關鍵詞:無人機、深度學習、橋梁檢測

摘要:

本計畫研究對象為梁式橋、板橋、箱型橋等三種類型的混凝土橋梁,研究目標為利 用無人機拍攝橋梁之主梁、橫隔梁、橋墩/帽梁、橋面板、橋台、翼牆/擋土牆等構件影 像,再透過 AI 深度學習語意分割技術,偵測影像上橋梁表面各種劣化類型,包括混凝 土裂縫、混凝土剝落、鋼筋銹蝕、滲水、白華損傷等。本計畫之研究主題與重點可歸納 為四大項,分別為文獻分析、深度學習技術開發、無人機技術開發、橋梁 3D 建模與技 術推廣。

在深度學習技術開發部分,首先為針對資料庫資料進行清洗,最後本計畫共選取 4,262 張照片,進行各式劣化類型之人工標註,再依據規範與專家學者座談會建議,採 DRU連動性原則,進行 DRU 值的人工編輯與確認,其中 3,304 張的 DRU 值有編輯過, 變更比例達 77.48%。另外在精度驗證部分,使用資料庫資料 14 座橋梁共 4,805 筆,本 計畫透過相同資料清洗程序最後剩下 833 筆資料。本計畫開發了兩種語意分割深度學習 模型,包括 DeepLab v3++與 Lawin,以及開發一個 DRU 推估模型。經過精度驗證與測 試,證明深度學習語意分割方法進行橋梁影像自動偵測劣化區具有可行性;但 DRU 推 估模型部分雖然具有應用潛力,但精度驗證部分,因 DERU評等標準不一致問題、訓練 資料數量與多樣性不足,仍有改進空間。

在無人機技術開發部分,本計畫結合 VIO、IMU、RTK 與 UWB,開發一融合定位 演算法,可以在有無 GNSS 訊號的環境中進行自主飛行與拍照,提供無人機全局一致性 的絕對定位結果,初步驗證絕對定位誤差小於 30 公分。此外本計畫設計開發一款 Y6 型 橋梁檢測專用無人機,搭載上下旋轉 180 度之雲台,包括專門設計之 LED 補光設備, 同時利用橋梁 3D 模型協助航線規劃。

1	- 1.	1.17				
出版日期	負數	定價	本出版品取得方式			
112年4月	254	300	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品,公營、 公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱;私人及私營機 關團體可按定價價購。			
備註:1.本研究之結論與建議不代表交通部之意見。						
2. 本研究係使用交通部經費辦理。						

#### PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS

#### INSTITUTE OF TRANSPORTATION

#### MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: Application of UAV with AI image recognition for bridge inspection (1/2)- Technology development of AI technology for bridge component defects recognition						
ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER			
ISBN 978-986-531-490-3(pbk.)	1011200382	112-033-2329	111-EDB006			
DIVISION: Transportation Engine	eering Division		PROJECT PERIOD			
DIVISION DIRECTOR: Wei-She	n Lai					
PRINCIPAL INVESTIGATOR: W	ei-Shen Lai		FROM March 2022			
PROJECT STAFF: Chih-Chao Hu			10 December 2022			
PHONE: 02-23496821						
FAX: 02-25450427						
RESEARCH AGENCY: National Cheng-Kung University						
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Ji	PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jiann-Yeou Rau					
PROJECT STAFF: Chao-Hung Li	PROJECT STAFF: Chao-Hung Lin, Kuang-Yen Liu, Chih-Ching Li					
ADDRESS: No. 1, University Road, Tainan City						
PHONE: 06-2757575						
KEY WORDS: Unmanned Aerial Vehicle, Machine Learning, Bridge Inspection						

ABSTRACT:

The research targets of this project are three concrete bridges, i.e., beam bridge, slab bridge, and box girder bridge. The goal is to utilize unmanned aerial vehicles (UAVs) to acquire images of several bridge components, such as the main girder, diaphragm girder, pillar, pillar cap, slab, abutment, and wing wall. Later, AI machine learning semantic segmentation technology was applied to detect several bridge defects, such as concrete cracks, concrete spalling, rebar corrosion, infiltration, and efflorescence. In summary, the research topics and significant issues include the following parts: literature review, development of machine learning technology, development of UAV technology, bridge three-dimensional (3D) modeling, and technology promotion.

In the development of machine learning technology, we have cleaned up the TBMS2 database and chose 4,262 photos for defects labeling and DRU editing and assurance, in which a total of 3,304 images have been revised, which occupied 77.48%, based on the consistency of D, R, and U values in the specification and suggestions from the experts. For accuracy evaluation purposes, 4,805 data points were collected from 14 bridges in the database. After the same data cleaning procedure, 833 data points remained. This project developed two deep learning semantic segmentation models, including DeepLab v3++ and Lawin, as well as a DRU estimation model. After accuracy assessment and testing, the developed segmentation methods have high feasibility in bridge defect detection. However, though the developed DRU estimation model has high potential in real applications, its accuracy still needs to be improved because the DERU scoring standard is varied, and the number of training data and their diversity are insufficient.

In the development of UAV technology, this project has developed a data fusion positional algorithm based on VIO, IMU, RTK, and UWB that can conduct self-flying and image acquisition under a GNSS-denied environment. It offers the UAV a global and consistent positional result. After several preliminary experiments, an absolute positional error of less than 30 cm was obtained. In the meantime, this project has designed a Y6 UAV dedicated to bridging inspection. It is also equipped with a gimbal capable of 180 degrees of up-down rotation angle and an LED light. We use a bridge 3D model for flight path planning.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE			
April 2023	254	300			
1. The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.					
The budget of this research project is contributed by Ministry of Transportation and Communications					

# 目錄

目錄	
圖目錄	V
表目錄	XII
第一章	緒論1
1.1	研究緣起1
1.2	研究內容與工作項目
1.3	計畫研究流程6
第二章	文獻蒐集與分析9
2.1	國內外無人機於橋梁檢測相關之文獻蒐集9
2.2	國外私人公司或研究單位與橋梁檢測相關的服務或專案10
22	AI人工智慧於橋梁劣化分析相關文獻分析
2.5	
2.3	無人機橋下定位導航相關文獻分析
2.3 2.4 第三章	無人機橋下定位導航相關文獻分析
2.3 2.4 第三章 3.1	<ul> <li>無人機橋下定位導航相關文獻分析</li></ul>
2.3 2.4 第三章 3.1 3.2	<ul> <li>無人機橋下定位導航相關文獻分析</li></ul>
2.3 2.4 第三章 3.1 3.2 3.3	<ul> <li>無人機橋下定位導航相關文獻分析</li></ul>
2.3 2.4 第三章 3.1 3.2 3.3 3.4	<ul> <li>無人機橋下定位導航相關文獻分析</li></ul>
2.3 2.4 第三章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5	<ul> <li>無人機橋下定位導航相關文獻分析</li></ul>
2.3 2.4 第三章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6	<ul> <li>無人機橋下定位導航相關文獻分析</li></ul>
2.3 2.4 第三章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 第四章	<ul> <li>無人機橋下定位導航相關文獻分析</li></ul>
2.3 2.4 第三章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 第四章 4.1	<ul> <li>無人機橋下定位導航相關文獻分析</li></ul>

	4.3	三種深度學習模型劣化區域自動判識成果精度分析1	08
	4.5	AI 影像辨識成果測試1	13
	4.6	無人機照相補光設計與測試成果1	19
	4.7	無人機拍攝橋梁各構件之航線規劃初步成果1	21
	4.8	橋檢無人機設計製作與測試成果1	32
	4.9	橋下無 GNSS 之定位導航測試成果1	36
	4.10	) 無人機測試場域之建置1	55
第五	章	結論與建議1	63
	5.1	結論1	63
	5.2	建議1	64
參考	文鬳	٤1	65
附錄	: 1:	期中報告審查會議審查意見處理情況表1	71
附錄	: 2:	期末報告審查意見處理情況表1	81
附錄	3:	橋檢專家諮詢會議紀錄1	.99
附錄	: 4:	「應用 AI 影像技術辨識橋梁構件劣化」座談會會議紀錄2	.09
附錄	5:	影像劣化區域辨識結果2	13
附錄	: 6: C	DeepLab v3+與 DeepLab v3++影像劣化辨識結果比較2	19
附錄	; 7: 1	4 座橋梁驗證資料清洗成果2	23
附錄	8: 1	4 座橋梁驗證圖片 DRU 修訂範例2	25
附錄	: 9: C	DRU 模型測試結果2	29
附件	10:	資料庫-DRU 修訂範例	35

# 圖目錄

置	1.1 近年重大橋梁倒塌事件	1
圖	1.2 計畫研究流程圖	7
圖	1.3 AI 裂縫偵測成果與橋梁仿真 3D 模型整合套疊	8
圖	2.1 以人員吊掛方式進行橋梁檢測或修補	9
圖	2.2 使用橡皮艇進入橋底或橋梁專用檢測車進行橋梁檢測	9
圖	2.3 無人機檢查橋梁作業情景與拍攝橋墩混凝土劣化之影像	11
圖	2.4 無人機近距離拍攝橋梁下管線	12
圖	2.5 測試橋梁之 3D 模型	12
圖	2.6 無人機拍攝 Hyrôme 高架橋作業情景	13
圖	2.7 LPC n°47 檢測裂縫結果圖	13
圖	2.8 無人機影用於橋梁數化之成果圖	14
圖	2.9 無人機檢查丹尼爾·卡特·比爾德橋作業情景	15
圖	2.10 無人機檢查德拉瓦紀念橋作業情景	16
圖	2.11 US-31 公路橋梁熱影像與橋梁 3D 模型	17
圖	2.12 無人機檢查橋梁概念研究作業	18
圖	2.13 LiDAR 3-D 模型顯示 0.5 英吋之結構偏差	18
圖	2.14 無人機檢查橋梁作業情景	19
圖	2.15 無人機檢查金星紀念橋作業情景	19
圖	2.16 CNN 結構圖(一)	20
圖	2.17 CNN 輸出結果圖及錯誤處放大圖	21
圖	2.18 CNN 結構圖(二)	22
圖	2.19 訓練過程圖(Cha et al., 2017)	22
圖	2.20 缺陷區域偵測結果圖(Cha et al., 2017)	22
圖	2.21 ConvNet 結構圖	23
圖	2.22 ASPP 結構圖	23

圖	2.23	R-CNN 結構圖	5
圖	2.24	R-CNN 裂縫偵測與量化結果25	5
圖	2.25	多尺度 CNN 結構圖	5
圖	2.26	MS-CNN-10 與 MS-CNN-5 種類分類結果混淆矩陣圖	5
圖	2.27	MS-CNN 橋梁分類結果圖27	7
圖	2.28	FCN 結構圖27	7
圖	2.29	OBIA 分類規則	;;
圖	2.30	Unet 網路架構	)
圖	2.31	SegNet 架構圖	)
圖	2.32	SegNet 與另 5 種方法分割結果圖31	
圖	2.33	FL-SegNet 結構圖31	
圖	2.34	FL-SegNet 與另外兩方法之結果比較圖32	2
圖	2.35	FL-SegNet 與另外兩方法之偵測準確度比較	2
圖	2.36	DeepCrack 模型架構	;
圖	2.37	(a)FPN 架構 (b)Deeply Supervised CNN 架構34	ŀ
圖	2.38	Deeply Supervised CNN 架構圖34	ŀ
圖	2.39	shortcut 模塊結構圖	5
圖	2.40	ResNet 與另兩種網路結構比較圖	5
圖	2.41	ImageNet 2012 分類數據集測試結果圖36	5
圖	2.42	CrackSeg 結構圖	7
圖	2.43	CrackSeg 與另 6 種方法分割結果圖	;;
圖	2.44	PSPNet 結構圖	)
圖	2.45	PSPNet 與另外 4 種網路對 PASCAL VOC 2012 影像分割結果圖	)
啚	2.46	Improved DeepLab V3+模型架構圖41	
圖	2.47	Optimizes decoder 架構圖42	)
圖	2.48	YOLOV4 與 V3 效能比較44	ŀ

圖	3.1	橋梁管理資訊系統資料清洗與深度學習訓練、驗證流程圖
圖	3.2	人工標註6種劣化類別49
圖	3.3	橋梁構件劣化影像辨識深度學習模型架構50
圖	3.4	空間金字塔池模塊與編碼解碼器結構圖51
圖	3.5 I	DeepLab v3+網路結構圖51
圖	3.6	空洞卷積運作圖(左圖)與空洞率與感受野示意圖(右圖)
圖	3.7	空洞空間金字塔池化
圖	3.8	殘差網路模組結構
圖	3.9 2	Xception-65 結構圖包含輸入階段、中層結構與輸出階段53
圖	3.10	空洞殘差網路 DRN 架構圖(Yu et al., 2017)54
圖	3.11	空洞卷積之網格效應
圖	3.12	本研究所使用的 DeepLab v3++網路結構圖56
圖	3.13	Cutmix 成果圖
圖	3.14	類神經網路模型超參數最佳化流程58
啚	3.15	橋梁之裂縫(左)與銹蝕影像(右)59
啚	3.16	橋梁白華、滲水、銹蝕、剝落範例60
圖	3.17	劣化評等表 C3.3.560
圖	3.18	影像辨識成果驗證流程61
圖	3.19	裂縫線性影像融合例子,原劣化影像與劣化區域機率值融合64
圖	3.20	本研究所使用的 DRU 推估神經網路模型65
圖	3.21	劣化類別辨識結果結合
圖	3.22	AI 模型整合與橋梁構件劣化判識流程67
圖	3.23	(左)空間解析度與照片涵蓋範圍計算示意圖、(右)垂直攝影
圖	3.24	拍攝距離 2.7 公尺與 4 公尺之拍攝範圍示意圖 69
圖	3.25	在距離 2.7 公尺時,前後左右相鄰照片 60%重疊率下之間距
圖	3.26	(左)傾斜攝影下計算地面解析度、(右)透視投影變形71

圖 3.27	不同相機光軸傾角下,從近點到遠點之空間解析度。	.71
圖 3.28	大梁、橋面板與橫隔梁下方採垂直往上拍攝	.72
圖 3.29	大梁、橋面板與橫隔梁下方之航線	.73
圖 3.30	相機橫擺傾斜攝影拍攝大梁側邊	.74
圖 3.31	相機直擺傾斜攝影拍攝大梁側邊	.74
圖 3.32	無人機拍攝大梁側邊之航線設計方式示意圖	.75
圖 3.33	傾斜攝影拍攝橫隔梁側邊	.75
圖 3.34	無人機拍攝橫隔梁側邊之航線規劃方式	.76
圖 3.35	拍攝橋兩側大梁側邊與橋面板下方	.77
圖 3.36	拍攝帽梁立面方式	.78
圖 3.37	拍攝帽梁下方與橋墩之方式	.78
圖 3.38	無人機拍攝圓柱型橋墩之航線規劃方式	.79
圖 3.39	無人機拍攝橋台之航線規劃方式	.79
圖 3.40	箱型梁 3D 示意圖	80
圖 3.41	無人機拍攝箱型梁側面之航線設計方式	80
圖 3.42	無人機拍攝箱型梁下部弧面之航線設計方式	81
圖 3.43	箱型梁護欄、橋面板底部與兩面轉彎處之航線與拍攝方式	.82
圖 3.44	物件化橋梁 3D 模型範例	.83
圖 3.45	照片屬性等資料寫入 EXIF	.84
圖 3.46	無人機橋面下多技術融合演算定位巡檢監控示意圖	.84
圖 3.47	本研究專為橋梁檢測設計開發之 Y6 橋梁巡檢無人機	.86
圖 3.48	無人機飛行控制與監控示意圖	.87
圖 3.49	多技術融合演算定位技術算法流程圖	.87
圖 3.50	無人機橋梁巡檢橋面下定位及導航示意圖	.88
圖 3.51	視覺與 IMU 融合演算定位架構	.89
圖 3.52	TD100-Fusion450 多技術融合演算定位技術無人機	.89

圖	3.53	UWB 定位運作方式	90
啚	3.54	坐標系統及轉換	91
圖	3.55	GRVINS 演算法流程圖	93
圖	4.1	影像拍攝缺失(範圍太大、植被遮蔽裂縫、背光拍攝主體幾乎全黑等)	99
圖	4.2	資料錯置(目錄 D2 屬於翼牆/擋土牆,照片內容卻是橋墩)	100
圖	4.3 I	D 值之設定標準不一致	100
圖	4.4	大量重複照片	101
圖	4.5	照片內容與文字不一致	101
圖	4.6	照片內容錯誤(為河道高程剖面圖或熱紅外影像)	102
圖	4.7	照片雜訊(內含人、手、裂縫尺或其他標示物)	102
圖	4.8	照片內容錯誤(為 3D 電腦繪圖顯示劣化區相對於橋梁構件之位置)	103
圖	4.9	資料錯誤(同一張照片重複上傳到不同年期橋梁)	103
圖	4.10	左:原始影像右:原始之標註影像	108
圖	4.11	DeepLab v3+、DeepLab v3++與 Lawin 影像劣化辨識結果比較	109
圖	4.12	推估模型訓練損失函數收斂曲線圖(藍色為訓練資料,橘色線為驗證資料)	111
圖	4.13	D、R、U 各類別預測成果	113
圖	4.14	驗證圖片(1)	114
圖	4.15	驗證圖片(2)	115
圖	4.16	驗證圖片(3)	115
圖	4.17	驗證圖片(4)	116
圖	4.18	驗證圖片(5)	116
圖	4.19	3D 模型構件編號納入航線規劃	121
圖	4.20	以Blender進行無人機航線規劃之流程	122
圖	4.21	以 Blender 規劃之無人機航線	122
圖	4.22	Blender 之物件資訊寫入判斷	123
圖	4.23	橋梁構件編碼原則	124

圖	4.24	台 61 線近布袋漁港之橋梁13	0
圖	4.25	台 61 線近布袋漁港橋梁之構件編號13	1
圖	4.26	軸距 850 mm 之多旋翼無人機 TD-Y6B-85013	3
圖	4.27	軸距 1200 mm 之多旋翼無人機 TD-Y6B-120013	3
圖	4.28	多旋翼無人機製造測試流程13-	4
圖	4.29	實驗測試地點環境照13	6
圖	4.30	實驗設備及所搭載之無 GNSS 定位模組13	7
圖	4.31	實驗測試路徑圖13	8
圖	4.32	2 VIO 融合結果(圖左路徑 1,圖右路徑 2)13	9
圖	4.33	VIO+GPS 融合結果(圖左路徑 1,圖右路徑 2)13	9
圖	4.34	VIO+GPS+UWB 融合結果(圖左路徑 1,圖右路徑 2)14	0
圖	4.35	VIO、VIO+GPS、VIO+GPS+UWB 融合結果比較(圖左路徑 1,圖右路徑 2)14	1
圖	4.36	路徑1畫於 google map 地圖上(VIO+GPS+UWB)14	1
圖	4.37	路徑2畫於 google map 地圖上(VIO+GPS+UWB)14	1
昌	4.38	UWB 基站架設數量對融合定位之影響14	2
圖	4.39	台 61 測試場域及誤差量測14	7
圖	4.40	台 61 橋下之 GRVINS (橘線)定位與 GPS(綠線)的結果14	7
圖	4.41	TD-Y6B-1200 與 GRVINS 模組整合及視覺校正14	8
圖	4.42	TD-Y6B-1200 與 GRVINS 模組融合後之視覺校正結果14	8
圖	4.43	VIO (視覺+IMU)測試結果14	9
圖	4.44	Nooploop 簡版 UWB 及 Pozyx UWB 訊號範圍測試環境15	3
圖	4.45	地面控制點分佈與施測情況15	6
圖	4.46	經空三平差後照片之分佈(藍色:UAV,粉紅色:地面攝影)15	6
圖	4.47	全橋密集點雲側視圖15	7
圖	4.48	S5 之密集點雲15	7
圖	4.49	S6之密集點雲15	7

圖	4.50 \$	S7 之密集點雲(0.3 跨箱型梁)	158
圖	4.51	局部放大 I 型梁密集點雲	158
圖	4.52	三維網格模型(S6)	159
圖	4.53	三維網格模型(S7)	159
圖	4.54	橋梁仿真三維模型	160
圖	4.55	以 SketchUp 數化物件化橋梁三維模型(含密集點雲)	160
圖	4.56	以 SketchUp 數化物件化橋梁三維模型(不含密集點雲)	161
圖	4.57	以 Blender 顯示物件化橋梁三維模型之構件編號	161

# 表目錄

表 2-1 國外相關學研單位使用無人機進行橋梁檢測之報導	10
表 2-2 各速率之空洞卷積準確度比較表	24
表 2-3 ConvNet 與另外兩方法之準確度比較表(Xu et al., 2019)	24
表 2-4 R-CNN 裂縫量化表	25
表 2-5 損失函數成果比較表	29
表 2-6 SegNet 與另 5 種方法之準確度比較表	
表 2-7 DeepCrack 與其他現有模型之成果比較表	
表 2-8 消融實驗成果比較	35
表 2-9 模型成果比較	35
表 2-10 CrackSeg 與另 6 種方法之準確度比	
表 2-11 PSPNet 與其他網路對 PASCAL VOC 2012 各類別分割準確度比較表	40
表 2-12 成果比較表	41
表 2-13 有無使用深度監督(DSV)模組和遷移訓練(TL)之成果比較表	42
表 2-14 使用不同預訓練模型與資料集之成果展示	43
表 3-1 公路一般性橋梁之檢測構件	48
表 3-26 種橋梁檢測構件之劣化評等表	49
表 3-3 各劣化類別使用之增強函數對應表	57
表 3-4 銹水、滲水影像	61
表 3-5 混淆矩陣說明表	62
表 3-6 無人機拍攝橋梁影像標準	68
表 3-7 自動路徑規劃參數表	83
表 3-8 Sony 相機以及 15 及 50 mm 鏡頭	85
表 4-16 種重要構件 3 種劣化類型不同 D 值之數量統計	96

表 4-2 13 種構件之照片數量	96
表 4-3 新增 32 種劣化類型	97
表 4-4 人工標注各式劣化類型之統計	98
表 4-5 橋墩/帽梁劣化評等(RC)	106
表 4-6 已编修劣化圖片統計表	107
表 4-7 辨識成果之指標比較	110
表 4-8 DRU 推估模型 1 驗證結果	
表 4-9 DRU 推估模型 2 驗證結果	112
表 4-10 DRU 推估模型 3 驗證結果	112
表 4-11 DRU 推估模型驗證資料統計數據	
表 4-12 14 座橋梁影像劣化區域辨識與 DRU 推估模型測試結果	117
表 4-13 DRU 推估模型 14 座橋梁測試統計數據	118
表 4-14 預計搭載於橋梁巡檢無人機之補光設計	120
表 4-15 補光設計之參數測試結果	120
表 4-16 Blender 之物件資訊(懷客橋)	
表 4-17 Blender 中之構件編號轉換公式	125
表 4-18 橋梁構件資料中英對照表	127
表 4-19 設定無人機安全距離	129
表 4-20 無人機航線規劃模擬動畫	129
表 4-21 無人機模擬動畫中序列編號及構件編號	130
表 4-22 台 61 線近布袋漁港橋梁路徑規劃之 Blender 物件資料	131
表 4-23 預計搭載於橋梁巡檢無人機之相機及鏡頭規格	134
表 4-24 多旋翼無人機及其相關酬載之重量	135
表 4-25 多軸無人機測試專用紀錄表	135
表 4-26 UWB 訊號有效範圍測試(TD-Q-650)	143

表 4-27 GRVINS 定位精度測試(TD-Q-650)	146
表 4-28 UWB 訊號範圍測試(TD-Y6B-1200)	150
表 4-29 GRVINS 定位精度測試(TD-Y6B-1200)	151
表 4-30 Pozyx UWB 與毛紹剛教授的 UWB 比較表	153
表 4-31 Nooploop 簡版 UWB 及 Pozyx UWB 訊號範圍測試結果比較表	154

### 第一章 緒論

### 1.1 研究緣起

橋梁為陸上交通之重要結構物,一旦損壞發生事故,除直接影響兩地交通及民生經濟外, 更可能因造成人員傷亡,連帶使得橋梁管理機關必須面對責難與究責,並衝擊政府形象。所以 任何斷橋損傷事件,在任何國家都是重大災害事件,因此維持橋梁整體狀況於正常良好使用情 況,以確保民眾通行安全為橋梁養護之首要目標。近幾年發生幾個重大橋梁倒塌事件,例如107 年8月14日義大利莫蘭迪大橋崩塌、108年10月1日宜蘭縣南方澳大橋倒塌、108年10月 10日中國大陸江蘇省無錫市國道高架橋倒塌,以及109年義大利奧利大橋倒榻等(如圖1.1), 都造成重大衝擊。





義大利奧拉橋倒榻



江蘇無錫高架橋倒塌



南方澳大橋倒塌

圖 1.1 近年重大橋梁倒塌事件

以2018 年 8 月 14 日義大利莫蘭迪大橋崩塌為例,中國土木水利期刊(王炤烈,2018)於事件 後製作「義大利 Morandi 橋崩塌帶來的省思特輯」,該事件造成 43 人死亡與 14 人受傷,並包 括 30 幾輛汽車墜落。此外彭康瑜等人(2018)分析莫蘭迪大橋崩塌的原因,主要包括四大部分 分別為:外在環境因素、材料老劣化因素、結構系統因素與維修管理因素,其中維修管理因素包 括檢測維修未落實、超過養護時間未維修、維修或改善預算不足、管養人力不足等。為免重蹈 覆轍, 王炤烈等人(2018)提出許多建議,其中一點即為橋梁於營運階段應開發橋梁檢測技術, 運用無人機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)、影像辨識、人工智慧(Artificial Intelligent, AI) 等技術,讓科技技術導入外業作業人力密集且環境嚴苛的橋檢工作,以落實橋梁定期檢測作業, 使橋梁每一構件都可詳實記錄損傷及劣化情況,並追蹤或提出改善措施。

橋梁養護建基於良好的橋梁檢測品質之上,檢測時應將橋梁內部及外部各種狀況、缺失及 損壞,逐跨逐構件詳細記錄與評估,以作為養護時之決策參考;橋梁管理機關依據橋梁檢測結 果編列預算,進行維修、補強,甚至拆除重建,以維持橋梁安全於一定水準內,所以橋梁安全 與橋梁檢測品質的良窳有直接相關,橋梁檢測是維護橋梁安全的第一線作業,因此如何維持橋 梁檢測的良好品質,是各橋梁管理機關需認真思考面對。

橋梁檢測最基本檢測方式為目視檢測,由檢測人員以目視檢查橋梁構件外觀,就其損壞狀 況逐一記錄,並依其所受之專業訓練、經驗進行評判分級,所以檢測人員的專業素質及工作態 度,為橋梁檢測品質最重要的因子。但涉及到人員因素,難免就會有主觀上的盲點或專業上的 不足,甚或因業務繁忙、怠惰偷懶,而未能依照作業流程詳細檢測,進而影響到橋梁檢測品質。

由國外經驗可知,藉由建立結構檢測方法及完善評估制度,可維護結構物安全、經濟之效 益,達到增長使用壽齡之目的,爰交通部亦針對橋梁安全維護建立檢測作業相關規範、手冊、 作業要點、評估方法以及修繕與補強對策與工法。

- 依交通部頒布「公路橋梁檢測及補強規範」橋梁檢測依檢測時機可分為定期檢測、特別檢 測與詳細檢測三類,其目的分別如下:
  - 定期檢測: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及其原因, 而定期進行之檢測。
  - (2) 特別檢測:當重大事故或災害發生後,為瞭解損傷程度及防止災害擴大;或巡查發現 顯著異狀及公路養護管理機關、公路養護單位認為必要時而實施之檢測。
  - (3) 詳細檢測:橋梁於定期檢測或特別檢測後,認為有必要時,以儀器或相關設備進行局 部破壞或非破壞檢測等之檢測;或對跨河橋梁所在河道狀況、基礎沖刷情形之檢測; 或針對特殊性橋梁重要構件,依其維護管理作業計畫辦理之檢測。
- 橋梁檢測頻率依檢測類別、橋況、橋齡、交通狀況、橋址環境及重要性等而定,公路養護 管理機關可視其組織編制及受檢測橋梁之重要性,訂定檢測頻率,原則上檢測頻率如下:
  - (1) 定期檢測:新建橋梁應於完工使用後2年內進行第1次定期檢測,爾後定期檢測之間 隔以2年為原則。如有特別情況,公路養護管理機關、公路養護單位得視實際狀況調 整,惟不得超過4年。
  - (2) 特別檢測:於重大事故、災害發生後或巡查發現顯著異狀及公路養護管理機關、公路 養護單位認為必要時辦理之。

(3) 詳細檢測:橋梁於定期檢測或特別檢測後,認為有必要時進行之。

(4) 特殊性橋梁檢測頻率應依其維護管理作業計畫所訂頻率辦理。

橋梁檢測以目視為主,儀器為輔,於特定週期和特別時期,對橋梁構件進行合宜之檢測, 以期提早發現問題,掌握損傷劣化情況,採取必要之對策,使橋梁保持於良好狀態。檢測除以 繪圖或照片記錄劣化或損傷部位外,宜以量化方式評估各構件之劣化情形,建立橋梁現況之基 本評估資料。檢測時需判定劣化程度(Degree)(D值)、劣化範圍(Extent)(E值)、劣化情況對橋 梁結構使用性與用路人安全性之影響度(Relevancy)(R值),以及處置的急迫性(Urgency)(U值)。

定期檢測是以目視搭配便於攜帶之工具進行檢測,目視可分為直接目視與間接目視。直接 目視係指檢測人員以肉眼直接檢視橋梁構件;間接目視係指檢測人員使用望遠鏡、高解析度相 機、無人遙控載具、工業內視鏡等拍攝影像,或以重錘、水準尺、測距儀等易於攜帶之設備測 得數據,再由檢測人員進行判斷。有別於97年之「公路鋼結構橋梁之檢測及補強規範」版本, 107年版的規範中特別提及,當檢測人員難以用徒步或搭乘輔助載具之方式接近橋梁構件時, 則以間接目視之方式進行檢測,也就是可使用無人遙控載具搭載高解析度相機進行拍攝協助檢 測,與本研究之目的相契合。此外107年版規範中對於D.R.U.之評等方式,不再以定量方式規 範,改以定性方式描述,例如裂縫大小改以細微裂縫、明顯裂縫及嚴重裂縫描述,易於橋檢人 員實地操作。

依據全國橋梁統計資訊網資料顯示,目前全臺灣車行橋梁數量共有2萬3千多座,包含交 通部及各縣市政府所轄橋梁,而國內每年皆有上億元的橋梁檢測委託工作案,包括車行橋及鐵 道橋,如高速公路局、高鐵局、公路總局、鐵路局、各縣市政府等,過去幾乎都採用目視檢測 及人工記錄,但自108年起,已有部分橋管機關委外檢測同時,要求得標廠商採用高解析數位 影像進行自動檢測測試研究。近年來,UAV技術及運用範圍快速發展擴大,使用UAV可減少 橋梁檢測的成本,同時降低現有橋梁檢測方法的風險,爰如何運用UAV有效的協助進行橋梁 檢測,乃是深具發展潛力的新興課題。

#### 1.2 研究內容與工作項目

本研究共為2年(111~112年),研究對象以混凝土橋梁為主,例如梁式橋、板橋、箱型橋 等,研究目的為利用無人機拍攝橋梁主梁、橫隔梁、橋墩、帽梁、橋面板、橋台、擋土牆等構 件,再透過AI 辨識技術,偵測無人機影像上橋梁表面各種劣化類型,包括混凝土結構裂縫、 混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、銹蝕、滲水、白華損傷等。本研究內容為四大項,分別為文獻 分析、深度學習技術、無人機技術、3D 建模等。

一、111年度研究內容與工作項目

1. 國內外相關文獻蒐集

3

蒐集國內外無人機搭配人工智慧影像辨識技術發展狀況(以橋梁檢測為主),並瞭解利用 AI 技術處理橋梁劣化高解析度影像的各種演算法及其成效。

- 2. 深度學習技術開發
  - (1) 影像辨識範圍及內容:
    - a. 涵蓋橋梁形式:公路梁式橋、板橋、箱型橋三種類型。
    - b. 影像辨識分析構件包含公路橋梁主梁、橫隔梁、橋墩、帽梁、橋面板、橋台、擋土牆 等。
    - c. 依據「公路橋梁檢測及補強規範」,須能辨識混凝土結構裂縫、混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、銹蝕、滲水、白華損傷等劣化類型。
    - d. 訪談公路總局及高公局實際橋梁檢測操作內容,以瞭解實際運作狀況,並提出判別構件損傷劣化等級之方式。
  - (2) 建立各式橋梁(梁式橋、板橋、箱型梁橋)劣化類型資料庫:
    - a. 針對上述橋梁種類建立橋梁構件劣化類型資料庫。
  - b. 使用橋梁管理資訊系統中劣化影像資料,同時先進行資料清洗及除錯等動作。
  - (3) 確認可行之影像辨識方式:
     提出人工智慧影像辨識具體架構,包含自動化偵測劣化、分析劣化類型、評估劣化評等。
  - (4)建立橋梁構件劣化影像辨識模式: 利用 AI 深度學習,建立橋梁構件劣化影像辨識模式,分析及判斷橋梁構件(主梁、横隔梁、橋墩、帽梁、橋面板、橋台、擋土牆等)損傷劣化類型,同時依據劣化狀況,評估D、R、U值。
  - (5) 影像辨識成果驗證:
    - a. 提出人工智慧化影像辨識的驗證方式(包含流程、準確率等)。
    - b. 從橋梁管理資訊系統選定 10 座橋梁的檢測影像資料,並進行人工智慧化影像辨識的驗證。
- 3. 無人機技術開發
  - (1) 制定橋梁各構件拍攝作業標準:
    - a. 依據「公路橋梁檢測及補強規範」定義之各類型構件,訂定個別拍攝標準。

b. 上述標準包括畫素、亮度、相片尺寸、焦點位置(各方向,涵蓋構件尺寸)及相片張數等。
 4. 制定無人機自動規劃飛行路線初步程序:

包括自動飛行至各構件位置拍照,同時記錄飛行路線之軌跡等資料,且將照片屬性對應至橋梁實際構件位置;此外自動化規劃飛行考量避障功能及橋址位置不同之影響。

- (1) 制定無人機自動規劃飛行路線程序:
  - a. 訂定梁式橋、板橋、箱型梁橋各構件拍照先後順序。
  - b. 依據拍照先後順序,訂定無人機自動規劃飛行路線程序(以自動飛行為主,人工操作為
     輔)。

c. 上述程序包括自動飛行至各構件位置拍照,同時記錄飛行路線之 GPS 等資料。
二、112 年度研究內容與工作項目

- 1. 深度學習技術開發:精進AI影像缺失辨識模式功能
  - (1) 以前期 AI 影像缺失辨識模式為基礎進行功能擴充,分析及判斷橋梁構件損傷劣化類型,同時依據劣化狀況,評估D、E、R、U值。
  - (2)上述劣化範圍E值須依「公路橋梁檢測及補強規範」定義進行評估,因此影像辨識須 能計算各構件劣化程度之範圍大小。
  - (3) 擴充 AI 影像缺失辨識模式功能(例如人機操作介面等)。
  - (4) 提升 D、E、R、U 值之評定正確率。
  - (5) 將 AI 影像缺失辨識模式模組化,同時製作成共享軟體或 APP 以利擴大各橋管機關使用。
- 2. 無人機技術開發:制定無人機自動規劃飛行路線程序
  - (1) 訂定梁式橋、板橋、箱型梁橋各構件拍照先後順序。
  - (2) 依據拍照先後順序,訂定無人機自動規劃飛行路線程序(以自動飛行為主,人工操作為 輔)。
  - (3) 上述程序包括自動飛行至各構件位置拍照,同時記錄飛行路線之 GPS 等資料。
- 3. 規劃全橋 3D 影像模型之建置
  - (1) 包括照片涵蓋度、搭接技術、構件劣化展現方式等。
  - (2) 規劃檢測結果自動上傳至本所既有的橋梁管理資訊系統。
- 4. 成果驗證
  - (1) 選定1座橋梁並由無人機自動化拍攝影像後,再進行AI影像辨識,並將檢測結果轉成 橋梁管理資訊系統格式並輸出。
  - (2) 驗證方式:陪同本所至現地橋梁稽核比對,或使用橋梁定期檢測資料進行比對。
- 5. 後續改善建議

提出後續無人機搭配 AI 影像辨識應用於橋梁檢測之精進及提升建議。

### 1.3 計畫研究流程

根據前述兩年度之研究內容,圖 1.2 為規劃兩年度之研究流程,111 年計畫主要為 AI 深 度學習技術與無人機技術之開發。在深度學習技術部分,主要分成兩種,第一種為各式劣化類 別之自動判識,例如混凝土裂縫、混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、銹蝕、滲水、白華損傷等; 第二種神經網路模型為利用橋梁管理資訊系統中所提供之 E 值,再使用前面技術自動判識出 之各種劣化類別,並進一步推估出照片中橋梁構建劣化程度之 DRU 值。無人機技術開發關鍵 在於橋下無 GNSS 訊號時之定位導航、拍攝設備之補光,以及結合橋梁 3D 模型按照所制定之 橋梁各構件拍攝作業標準進行航線規劃,因此研究結合 VIO、IMU、RTK 與 UWB,開發一融 合定位演算法,可以在有無 GNSS 訊號的環境中進行自主飛行與拍照,提供無人機全局一致性 的絕對定位結果;此外本計畫設計開發一款 Y6 型橋梁檢測專用無人機,搭載上下旋轉 180 度 之雲台,包括專門設計之 LED 補光設備,同時利用橋梁 3D 模型協助航線規劃。

112 年計畫則是整合 111 年計畫兩項研究成果,針對橋梁先以手動控制無人機拍攝低解析 影像,配合地面控制點建置橋梁仿真 3D 模型,再以人工數化與建立屬性得到物件化 3D 模型, 接著以半自動方式按照所制定之橋梁各構件拍攝作業標準進行航線規劃,再根據此航線設計以 無人機自動飛行與拍攝高解析影像(以偵測裂縫為目的),這些高解析影像與前面之低解析影像 一起以人工進行空三平差解算與相機率定,同時獲得每張照片之拍攝位置與姿態(外方位參數)。 接著將開發一套無人機橋檢影像分析軟體,結合視窗人機使用介面(GUI)並整合無人機所拍攝 之高/低解析影像(含相機率定參數與每張照片之外方位參數)與物件化橋梁 3D 模型(含構件編 號與矩形框),並針對每個矩形框全自動製作對應之高/低解析度正射影像,其空間解析度分別 為 0.2 mm 與 2~30 mm (視實際解析度而定)。接著利用 111 年所開發之第一種深度學習技術在 這兩種解析度之正射影像上全自動判識混凝土裂縫與其他劣化類別。但其偵測成果為影像形式, 為了統計劣化區量化數據,並與橋梁 3D 模型整合展示,必須進一步將劣化區影像全自動轉換 成 2D 向量(Shapefile)與 3D 模型(OBJ),如此即可利用 2D 向量圖資計算裂縫之寬度與長度,或 者其他劣化類別之最大寬、高與面積等統計量,以便與橋梁構件之尺寸進行比較,再根據交通 部公路橋梁檢測及補強規範中劣化評等原則以橋梁構件為單位全自動推估 DERU 之 4 個值。 後續橋檢人員可將有偵測到劣化之橋梁構件 3D 模型與劣化區 3D 模型進行套合,並以 3D 視 窗進行瀏覽如圖 1.3 所示,亦可在 3D 模型上進行測量劣化區尺寸,最後確認本軟體所推估之 DERU 值是否正確合理,亦可人工修改 DERU 後再製作橋檢報表。

6



圖 1.2 計畫研究流程圖



圖 1.3 AI 裂縫偵測成果與橋梁仿真 3D 模型整合套疊

### 第二章 文獻蒐集與分析

### 2.1 國內外無人機於橋梁檢測相關之文獻蒐集

傳統作業方式多採用人員吊掛(圖 2.1)或使用橡皮艇進入橋底及使用橋梁專用檢測車(圖 2.2)進行橋梁檢測或修補,但此種作業方式工作時間長,容易受天候影響,且危險性高,此外設備與人員檢測費用高,並需要專業訓練與證照才能作業,而評估成果易受個人主觀意見影響。比較美國、日本、法國與臺灣在橋檢之現況,薛強等(2012)提到臺灣目前橋檢的主要問題,包括評估方式有評判或填寫不易情形,DERU法受檢測人員素質與主觀判斷影響,不同人員檢測結果變異性大。檢測項目與表格部分,評估表恐因改版造成資料不連續且格式未統一,另檢測人力普遍不足,辦理方式與執行面上,有時會遭遇現地機具不足或道路無法通行。而落實橋檢以及資料能否反應橋梁現況最重要且最大問題是資料不正確,因此建議檢測工具應導入新科技,目前可針對狀況很差者考慮以數位檢測輔助,但不建議取代現行作法;未來配合資訊技術發展,軟硬體精進,可推行全面性數位檢測。





圖 2.1 以人員吊掛方式進行橋梁檢測或修補





圖 2.2 使用橡皮艇進入橋底或橋梁專用檢測車進行橋梁檢測

美國學者 Matija 等於 2015 年提出利用多軸 UAV 進行橋梁檢測,包括重建橋梁局部構件 之仿真三維模型,但沒有提到量測相關功能。日本國土交通省(2015 年)提出利用各式機器人進 行橋梁檢測之研究,包括各種多軸 UAV 搭載各種感測器(一般數位相機或熱感測器)、傳統檢 測車、吸附滑動型機器人、懸垂式吊架立體相機系統等,其中 UAV 成果部分,小沼惠太郎(2015) 提出利用 UAV 拍攝之影像重建橋梁 3D 模型,同時具有測量裂縫與表面剝落面積的功能,甚 至還包括記錄三維空間資訊之能力,但未提到是否可以利用歷史資料查詢新拍影像或利用兩期 資料進行變異分析的能力,以及是否採用人工智慧自動判識技術。

國內利用多軸無人飛行載具(UAV)進行橋梁檢測之研究與業務近年來已經逐漸增加,其中 高雄應用科大土木工程防災科技研究所(曾子峻,2011)主要是以拍攝之影像做為橋梁劣化之評 估,再透過 AutoCAD 協助尺寸之量測,最後以 DERU 與 ABCD 評估法記錄檢驗成果。另外中 央大學營建管理研究所(姚乃嘉,2013,2015)團隊則是透過第二代臺灣地區橋梁管理資訊系統之 建置,同時提出利用 UAV 影像協助記錄與評估橋梁劣化情況,包括 3D 橋梁模型之建置。

### 2.2 國外私人公司或研究單位與橋梁檢測相關的服務或專案

表 2-1 整理幾個外國私人公司或研究單位針對橋梁檢測所進行的服務與專案報導,這些 報導並非發表於期刊論文,各網站簡略之說明如下,詳細內容請參考其網頁:

單位或專案簡稱	國名	單位屬性	計畫或專案名稱(與網頁連結)
CROSSROADS	美國	大學研究單位	UAV Bridge Inspection Demonstration Project
Terra Drone Europe	达苗	むし八日	https://terra-drone.eu/bridge-
(前 Skeye B.V.)	们阑	私八公可	inspection/2015/01/25/
	法國	私人公司	Structural Inspections by Drone
SETEC			https://diades.fr/en/achievements/asf-hyrome-
			<u>viaduct</u>
GMTIB	德國	私人公司	https://www.infralytica.com/en/services/
SmartSensys, LLC	美國	私人公司	http://smartsensys.com/
Sonsofly			https://www.sensefly.com/blog/using-drones-
Schsenry			uas-for-bridge-inspection/
Intel	美國	私人公司	Intel Drone Solutions Modernize and Increase
			Efficiency for US Bridge Inspections
ROVDRONE	波蘭	私人公司	BRIDGE INSPECTIONS
Dronrgenuity	美國	私人公司	Virginia Drone Services
Aibotix	() ) ) () )	もんふき	Aibotix UAS Inspects Germany's Second-
AIUUUIX	12 四	松八公司	longest Bridge
University of	美國 大	大學研究單位	Bridge Inspection Robot Deployment Systems
Missouri	大西	八千听九千位	(BIRDS)
Delaware River and	美國 秉	私人公司	Delaware Memorial Bridge inspections
Bay Authority			
DRONITECH	印度 私人公司	私人公司	Evaluating the use of drones for Bridge
			Inspection
Michigan	美國	公家單位	Michigan Testing Drones For Bridge Inspections
transportation office			

表 2-1 國外相關學研單位使用無人機進行橋梁檢測之報導

OTIC	美國	公家單位	Ohio Turnpike and Infrastructure Commission
Florida Department of Transportation	美國	公家單位	Nooks and crannies
AASHTO	美國	公家單位	American Association of State Highway and Transportation Officials
DoT	美國	公家單位	Department of Transportation
TCORR	澳洲	私人公司	Drone inspection

#### 1. Crossroads

研究小組使用無人機進行橋梁檢查測試,同時檢查了4座明尼蘇達州的橋梁(分別在 Chisago、Morrison和 Stillwater 附近)。研究無人機是否可以幫助明尼蘇達州交通運輸部 (Minnesota Department of Transportation, MnDOT)降低橋梁檢查的成本,並減少橋梁檢查員 的風險,同時利用各種無人機功能來收集更多詳細信息,最後評估無人機在橋梁檢查的有 效性。該研究使用 Aeyron Skyranger 無人機進行視訊拍攝,並從中觀察是否能夠捕捉到各 橋梁已紀錄之各種缺陷或修整情況,例如缺少的螺絲母、裂縫、修補區等,拍攝情況與成 果如圖 2.3 所示。



圖 2.3 無人機檢查橋梁作業情景與拍攝橋墩混凝土劣化之影像

#### 2. Terra Drone Europe

該公司使用無人機進行許多目視檢查,在試驗中,橋梁試點選擇在老萊茵河靠近巴貝里奇的地方。這座橋梁梁底不高,無法以人工方式進行檢核,此外其高度也適合使用 Skeye 的 無人機進行影像拍攝。該團隊在橋梁的下方和側面拍攝許多高解析度的照片(圖 2.4),並生 成 3D 點雲和模型(圖 2.5),除可更好的觀察較難檢查的結構外,藉由與人工檢核比較可瞭 解無人機在橋梁檢測上的可行性。



圖 2.4 無人機近距離拍攝橋梁下管線



圖 2.5 測試橋梁之 3D 模型

3. SETEC

該團隊透過無人機執行許多橋梁與基礎設施的檢測,其中一個案例為拍攝 Hyrôme 高架橋 影像來進行多種形式的檢查工作(圖 2.6),主要使用其內部的 Dia-Map V2©軟體形成精度 圖,並可藉此將影像投影到 3D 模型上,同時允許以 1/10 毫米的精度進行損壞檢查。另外 生成的精度圖可以再根據其 LPC n°47 的方法在裂縫區域自動檢測裂縫(圖 2.7)並計算其裂 開程度。



圖 2.6 無人機拍攝 Hyrôme 高架橋作業情景



圖 2.7 LPC n°47 檢測裂縫結果圖

4. GMTIB

該公司專門從事無人機系統技術在建築物數位化的應用,而主要的對象包含橋梁、水壩、 歷史建物等,其無人機系統配備高性能相機拍攝高解析的影像,並提供高清實時視訊以進 行檢查,在這過程中可快速、安全、高效率地獲取高質量的資料用於後處理。最後可生成 的產品及相關服務包含高解析度正攝影像、3D 模型、雲端儲存及維護等(圖 2.8),此外也 使用人工智慧偵測劣化區域來對建物進行檢查工作。



圖 2.8 無人機影用於橋梁數化之成果圖

#### 5. Sensefly

MnDOT 和 Collins Engineers 進行一項合作,關於如何使用無人機提供更好的檢查數據,並 使檢查過程更加安全。目標是評估無人機在檢查橋梁時降低成本和提高安全性的潛力,並 製定行動指南,詳細說明何時以及如何最好地使用無人機。在 2015 年夏季,完成了第一 階段,檢查了全州的4座橋梁,使用 Aeryon SkyRanger 這款無人機,但也發現了一些缺 點,例如無法向上看,也無法在 GNSS 覆蓋率低或沒有 GNSS 覆蓋的橋梁下方飛行。而 後發現另一款無人機 albris,它附有超聲波感測器和額外的鏡頭,再加上可以直接向上看, 也可以在沒有 GNSS 的情況下運行,也就是說能在橋下飛行,因此計畫在第二階段評估 使用 SenseFly albris 無人機。成果顯示使用者在現場可以收集各種數據,例如靜態影像、 影片、紅外線影像、站點地圖和橋梁元素的 3D 模型等,獲取的資訊更加多元,且無須交 通維持工作,使設備和交通維持方面的成本顯著降低。若以傳統的檢查方法,檢查1座橋 通常會使用3輛檢測車,共要8天的檢查時間,花費約為 59,000 美元,且出需要5天, 這可節省 66% 的潛在成本。

6. Intel

使用無人機檢測位於俄亥俄州的丹尼爾·卡特·比爾德橋(Daniel Carter Beard Bridge)(圖 2.9),該橋梁為交通要道每天有 10 萬輛汽車通過,不宜封閉車道。在檢查過程中 Intel®無 人機拍攝 2,500 張高解析度影像,並生成 3D 模型以利分析,此外還將其應用於監視橋梁 的油漆老化以及鋼纜的穩定性。

14



圖 2.9 無人機檢查丹尼爾·卡特·比爾德橋作業情景

#### 7. ROVDRONE

任何細小的裂縫或腐蝕都可能導致橋梁嚴重的損壞,這種缺陷在傳統的檢查過程中很容易 被忽視,因為通常發生在無法接近的區域。該公司透過使用無人機搭載 UltraHD 4K 攝像 機拍攝影像並提供視訊以觀察橋梁,同時也會保留影像做為日後更多分析使用。藉由無人 機來檢查的好處不僅只在於檢查時的安全性,也節省時間和金錢,此外可以進行高品質影 像的檢查並留下紀錄,有利未來的檢查工作。

8. Dronegenuity

提供無人機的檢查服務,檢查對象包含橋梁、屋頂、儲存槽、塔樓等,其中橋梁檢查的部 分,團隊使用無人機從各個角度拍攝橋梁,尤其是著重在橋梁下方的影像拍攝,最後使用 高解析度的影像檢查銹蝕、裂縫、結構弱點或其他須注意的地方。

9. Aibotix

為滿足工業檢查和測量的最高標準,而使用自行開發的 Aibot X6 六軸無人機,它具有許多應用,包括電力線、風力渦輪機、橋梁和管道的檢查。團隊藉由 Aibot X6 檢查德國漢堡的 Köhlbrand bridge,該無人機配有泛光燈可以拍攝高解析度且清晰的影像,以便能精確紀錄 損壞,並將保存圖片、位置和其他飛行數據,減少檢查所需時間和工作量。

10. University of Missouri

開發橋梁檢查機器人部署系統(Bridge Inspection Robot Deployment, BIRDS),其中使用包括攀爬機器人、無人機、傳感器、數據採集單元等工具,透過 BIRDS 充當現場站用於數據蒐集,並傳輸到 INSPIRE 大學運輸中心的伺服器進行處理,而無人機在系統中負責提供影像給工程師,使其能夠將攀爬機器人或機器手臂派遣到正確位置。

11. Delaware River and Bay Authority

團隊選擇德拉瓦紀念橋(Delaware Memorial Bridge)進行無人機用於橋梁檢查測試(圖 2.10), 由於該測試區有大量的纜線,因此測試目標是評估靜止拍攝的影像和視訊內容的解析度是 否滿足需求,希望能夠以網格模式自動飛行無人機,並創建橋梁的 3D 圖像供檢查使用, 最終藉著無人機協助橋梁的檢查作業,在提升安全性以及作業速度的同時,達到節省經費 的目標。



圖 2.10 無人機檢查德拉瓦紀念橋作業情景

12. DRONITECH

機器人技術徹底改變橋梁、塔樓等各種基礎設施檢查,該團隊在橋梁檢查中使用無人機於 資訊蒐集上,例如橋梁的俯瞰圖,以及遠處不易看到的裂縫或腐蝕,與傳統方法相比,無 人機有許多優勢,包括可花更少的時間執行完整的檢查任務,同時亦降低作業風險,所得 到的數據可以即時分析,並儲存供後續使用,另結合 iCOR 等工具進行腐蝕區域評估,可 全面與深入地瞭解橋梁及混凝土設施的狀態,從而節省維護成本。

13. Michigan transportation office

密西根交通運輸部(Michigan Department of Transportation, MDOT)選取多座橋梁進行測試, 主要是以無人機拍攝靜態影像和視訊,包括該橋梁的交通情況以作為檢查的基礎,接著生 成正攝影像、DEM、熱影像以及全區之拼接影像,如圖 2.11 為美國密西根州 US-31 公路 上一座橫跨懷特河的橋梁,最終期望能提高維護成本效益,同時達到即時維護密西根州交 通基礎設施的目的。



圖 2.11 US-31 公路橋梁熱影像與橋梁 3D 模型

#### 14. OTIC

俄亥俄州收費公路和基礎設施委員會(Ohio Turnpike and Infrastructure Commission, OTIC) 已使用無人機完成首次橋梁檢查,檢查的橋梁是桑達斯基河大橋(Sandusky River Bridge)。 該委員會將無人機檢查的結果與現場檢查的結果進行比較,如果用無人機檢查橋梁證明是 成功的,當局將考慮允許承包商將無人機用於其他任務,例如建築物或緊急情況。

15. Florida Department of Transportation

佛羅里達理工大學與佛羅里達州交通運輸部(Florida Department of Transportation, FDoT) 及美國國家科學院(United States National Academy of Sciences, NAS)下之運輸研究委員 會(Transportation Research Board, TRB)一同進行無人機系統用於橋梁檢查的概念驗證研 究(圖 2.12)。研究團隊認為無人機系統可協助取得難以觸及構件之高解析度資料,此外無 人機可以搭載 LiDAR(圖 2.13)、熱傳感器、多光譜鏡頭等,以獲得特定類型的數據進行分 析,故將無人機系統納入橋梁檢查流程的潛在益處,包括大大降低檢查員相關的成本和安 全風險,同時提高結構安全評估的有效性和準確性。

在概念研究案例中,研究團隊藉由工業風扇實驗,瞭解無人機在不同飛行情況下的拍攝影 像質量,最終確定與拍攝目標保持2到3英尺的安全飛行距離下,具有檢測0.02英寸的混 凝土裂縫的能力,同時也能在相對弱光條件下保持足夠解析度的能力。而透過影像視訊進 行目視評估時,能夠使用無人機方法識別出生銹、裂縫或軸承變形等缺陷,這些結果強調 使用無人機進行橋梁檢查的優勢。

17



圖 2.12 無人機檢查橋梁概念研究作業



圖 2.13 LiDAR 3-D 模型顯示 0.5 英吋之結構偏差

### 16. AASHTO

根據美國國家公路和運輸官員協會(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)最新調查,有33個州交通部門已經或正在探索、研究、 測試或使用無人機檢查橋梁(圖 2.14)。報告說明傳統的橋梁檢查通常包括設置工作區、交 通改道和使用重型設備,相對於無人機而言,確可以快速進出與即時取得數據。密西根州 運輸部 (Michigan Department of Transportation, MDOT)估計,標準的橋梁檢查需要8個小時,且要由4人組成的工作人員和重型設備進行,費用估計為4,600美元;用無人機進行 相同的檢查僅需2個人2個小時,估計費用為250美元。


圖 2.14 無人機檢查橋梁作業情景

#### 17. DOT

美國國家運輸部門(The State Department of Transportation, DoT) 在金星紀念橋(Gold Star Memorial Bridge)進行無人機用於橋梁檢查的測試(圖 2.15),該橋每2年需要進行1次例行的檢查,每次需要3個月才能完成,通常還需要70英尺的卡車,且現場須派出警察並可能關閉車道。運輸部門目前的檢查方式是使用 Align M690L 無人機對橋梁北段的墩柱拍攝高解析度影像和視訊,隨後交由工程師進行分析,並將其與傳統檢查既有的數據進行比較。 DOT 期望在未來能更頻繁利用無人機技術檢查橋梁的構件,例如生銹的構件等,最後達到 無需關閉車道或租用卡車的目標。



圖 2.15 無人機檢查金星紀念橋作業情景

## 18. TCORR

該公司使用耐碰撞的 Elios 無人機搭配其內部的流程機器人(Robotic Process Automation, RPA),使無人機能在最安全的情況下,拍攝高解析度影像,並產生 3D 模型、熱成像等資訊,以利對橋梁、儲存槽、太陽能發電站、管線等目標進行評估。在調查過程中,所有的

訊息將存放於該公司的 TcorrSoft 軟體中,並允許客戶自動生成報告給修復團隊, Tcorr 藉 著提供目標物相關狀況、補救措施和風險的詳細報告協助檢查的進行,以協助客戶節省檢 查成本。

## 2.3 AI人工智慧於橋梁劣化分析相關文獻分析

- 在過去的十年中,可處理大量高維數據的可延展深度學習技術已經改變了許多領域,例如 自動駕駛、醫學成像和自然語言處理。深度學習方法通過自動執行特徵提取過程減少對人 類領域專業知識的需求,並已取代傳統的基於特徵的深度學習(Hinton et al., 2006; LeCun et al., 2015)。最主要原因是深度學習可通過分層地使用多層處理階段來完成目標偵測(LeCun et al., 2015; Liu et al., 2017)。以下針對利用 AI 人工智慧於橋梁劣化偵測相關研究進行分析 比較:
  - (1) 卷積神經網路(CNN)

當前深度學習在圖像處理領域獲得普及,特別是由於卷積神經網路(Convolution Nueral Network, CNN)(Cha et al., 2017)的興起。除了自動特徵提取外,由於 CNN 可以利用圖像中像素之間的局部空間相關性,因此 CNN 可以為複雜的圖像識別任務提供相當高可靠度的成果。與其他圖像識別算法不同,CNN 依賴的是空間分離,而不是空間位置,故比重視圖像上特徵變化位置的算法,更重視圖像中局部特徵的組合。 Cha et al. (2017)提出一種基於視覺的方法來測量裂縫,建立一個不受燈光、陰影、模

糊等因素干擾的 CNN 結構(圖 2.16)來檢測混凝土裂縫。該結構的第一層是 256×256×3 像素分辨率的輸入層,接著在 L5 處將空間大小減小到 1×1×96 進行通用化,並通過線 性整流單元(REctified Linear Unite, ReLU),最後 Softmax 層在 C4 卷積後,預測每個輸 入像元是破裂的還是完整的混凝土表面。



圖 2.16 CNN 結構圖(一)

訓練過程中使用 DSLR 攝像機從一棟工程大樓中獲取具有廣泛圖像變化範圍(包括照明、陰影等)的混凝土表面影像共 332 張,並依照所要求的圖像大小進行切割得到約40,000 張影像,其中的 32,000 張用於訓練,8,000 張用於驗證。結果顯示經過訓練的網路在訓練中的準確性為 98.22%,而驗證後的準確性則為 97.95%。輸出的結果如(圖 2.17)所示,其中紅框和藍框分別標示出有誤之處。



圖 2.17 CNN 輸出結果圖及錯誤處放大圖

目前道路和橋梁的檢查程序是通過子結構的檢查,以快速確定損壞的程度,其中包括可 能對結構強度造成損壞的外觀和裂縫。此過程需要專業工程師到場評估是否需維護,然 而工程師人力有限且工作費時。Kruachottikul et al. (2019)為能夠有效率維護道路與橋梁, 建立 CNN 網路(圖 2.18)以深度學習的方式進行缺陷區域的偵測,偵測目標包含裂縫、 剝落、侵蝕和污漬。



資料分類上,他們將所蒐集到的圖像依照拍攝距離分為3類:近距離(小於3米)、中 距離(3-8米)和遠距離(8米以上),並將包含缺陷的中距離圖像用做訓練資料,組 成3,926 張圖像組成的數據集。訓練過程如(圖 2.19)所示,最終可以達到 89%的總精度, 另從圖 2.20 可以看到透過 CNN 網路可以自動標示出有缺陷的區域,不過此方法僅限 於中等距離圖像,在距離限制上仍有待突破。



圖 2.19 訓練過程圖(Cha et al., 2017)



圖 2.20 缺陷區域偵測結果圖(Cha et al., 2017)

## (2) ConvNet

Xu et al. (2019) 提出 ConvNet(圖 2.21)是一種基於 CNN 的橋梁裂縫檢測方法,該網路以 Resnet50 作為骨幹,並參考 DeepLabV3 設計一種空間金字塔池(Atrous Spatial Pyramid Pooling, ASPP)(圖 2.22)和深度可分離卷積(Depthwise Separable Convolution)的特徵提取模塊。該研究在 ASPP 中使用了 3 種具有不同速率的空洞卷積層,各個特徵提取由單獨的分支進行平行處理,最後將特徵圖從並行網絡分支藉雙線性內插到原始圖像。



圖 2.21 ConvNet 結構圖



圖 2.22 ASPP 結構圖

此外使用 DJI Phantom 4 pro 拍攝測試模型所需要的圖像,所獲取的圖像共 2,068 張並透 過分割的方法建立 6,069 張圖像的數據集,包含 4,058 張裂縫圖像以及 2,011 張背景圖 像,使得裂縫圖片與背景圖片的比率約為 2:1。最後使用 4,856 張圖像作為訓練集, 1,213 張圖像作為測試集,通過調整不同速率的空洞卷積來瞭解其對整個模型的影響, 結果如表 2-2 與表 2-3 所示。根據表 2-3, ConvNet 在準確率上比 CNN 高 9.51%,研究 認為這主要是因為 ConvNet 可以更有效地提取裂縫特徵,並將裂縫與非裂縫區分開, 同時與原始的 Resnet50 相比, ConvNet 具有較低的誤報率,這代表在此方法中,背景 錯誤識別為裂縫的情況更少。

Atrous Rates	Training Accuracy	Testing Accuracy
[2,4,8]	99.03%	96.70%
[2,4,6]	99.61%	94.31%
[3,6,9]	99.55%	94.64%

表 2-2 各速率之空洞卷積準確度比較表

表 2-3 ConvNet 與另外兩方法之準確度比較表(Xu et al., 2019)

Methods	R	MA	Р	FA
Resnet50	99.03%	96.70%	93.66%	6.34%
CNN(Zhang,2016 ICIP)	99.61%	94.31%	86.96%	_
Proposed Method	99.55%	94.64%	96.69%	3.31%

#### (3) 區域卷積神經網路(R-CNNs)

有時橋梁所處位置可能存在安全性上的疑慮,使用帶有高性能視覺傳感器的無人機 (UAV)進行橋梁檢查便受到廣泛的關注。結合UAV以及深度學習算法檢測結構表面 上的裂縫,可以做為橋梁檢測的有效策略之一,Kim et al. (2018)建立區域卷積神經網路 (Region with Convolutional Neural Networks, R-CNNs)(圖 2.23)對已老化的混凝土橋梁進 行裂縫的偵測,最後使用圖像處理計算長度以及寬度。

研究使用 Cifar-10 數據集(https://www.cs.toronto.edu/~kriz/cifar.html),該數據集包含 50,000 張 10 種不同地物類別的圖像,例如飛機、汽車、鳥等,另研究增加 384 張包含 裂縫的圖像,一起預訓練網路。這些裂縫訓練資料,是在目標橋梁的結構中使用人力和 無人機兩種方法拍攝,並藉由圖像旋轉的方式來減少裂縫方向上的不平衡亦可增加圖 像。



圖 2.23 R-CNN 結構圖

為準確量化裂縫,需要知道圖像中確切的像素大小,研究將尺寸為70mm×70 mm 的平面標記物附著在結構上,並且使用無人機捕獲包括標記物和裂縫的結構做為測試資料。 透過 R-CNN 檢測的結果以及裂縫量化後的結果分別如(圖 2.24)所示,其中黃色矩形框 為偵測到裂縫的部分;另外表 2-4 則詳細說明各個裂縫的長度和寬度,經過驗證裂縫量 化算法所得的相對誤差約為1~2%。





圖 2.24 R-CNN 裂縫偵測與量化結果

表 2-4 R-CNN 裂縫量化表

	Crack Thickness (mm)	Crack Length (mm)
C-1	1.92	48.68
C-2	1.10	60.09
C-3	1.10	27.94
C-4	1.37	48.59
C-5	1.37	17.08
C-6	1.92	63.56
C-7	2.47	78.43
C-8	1.59	6.60
C-9	1.10	35.01
C-10	0.53	30.79
C-11	0.55	19.96
C-12	0.55	8.32

(4) 多尺度卷積神經網路(MS-CNN)

有時因為拍攝距離的不同,所獲得的影像會包含許多目標以外的景物,Narazaki et al. (2018) 認為當圖像包括來自不同結構的多個成分時,自動損傷檢測方法的應用將變得 越來越困難。為減少不正確的錯誤預測,研究首先建立一個多尺度(Multi-Scale, MS)CNN(圖 2.25),然後對 MS-CNN 的結果進行超像素演算(SLIC superpixel algorithm) 處理,將空間中的像素聚類,最後使用條件隨機場(Conditional Random Fields, CRFs)進 一步完成像素分類。



圖 2.25 多尺度 CNN 結構圖

為有效訓練模型,研究以橋梁為目標景物,並在城市場景中拍攝許多包含橋梁的影像, 這些場景影像一共有 10 個類別,包括橋、建築、綠地、人、交通工具、水體等,透過 22 層的 MS-CNN 來計算與 10 個場景類相對應的 Softmax 概率圖,並提取橋梁分量, 接著通過 Softmax 概率圖對輸入圖像進行增強,並進一步將其輸入到另一個 MS-CNN 中,以將每個像素分為 5 個分量類別之一。最後經由 MS-CNN 以及後處理所得到的混 淆矩陣如(圖 2.26)所示,總精度為 78.94%,分類結果示意圖如(圖 2.27)所示,其中(a)為 原始影像、(b)為 10 種類別時的結果、(c)為 5 種類別時的結果。



圖 2.26 MS-CNN-10 與 MS-CNN-5 種類分類結果混淆矩陣圖



圖 2.27 MS-CNN 橋梁分類結果圖

(5) 全卷積神經網路(FCN)

連冠婷 (2018) 以自動檢測橋梁裂縫為目標,使用無人機載具搭載消費型相機進行橋梁 表面影像拍攝,進一步建立裂縫的圖像數據集,並進行圖像增強以擴大數據庫。研究使 用全卷積網路(Fully Convolutional Networks, FCN)(圖 2.28),相較於 CNN,該網路不使 用全連接層,而是使用卷積層,這過程中能保留更多空間訊息;另外藉由物件式圖像分 析 (Object-Based Image Analysis, OBIA)(圖 2.29)與 FCN 檢測結果集成,提出一種混合 法,從而使 FCN 檢測結果能夠通過利用預先識別的裂縫,對特徵圖進一步細化,以獲 取較精準的裂縫寬度。

最終分別對 OBIA、FCN、混合法(FCN+OBIA)進行準確度比較,在生產者精度的部分, 3 種方法的精確度分別為 95.3%、85.6%、90.6%,而使用者精度分別為 80.8%、62.3%、 84.7%,實驗成果顯示混合法能得到較準確的成果。



圖 2.28 FCN 結構圖



圖 2.29 OBIA 分類規則

(6) Adaptive Cost-Sensitive Loss Function

對橋梁的劣化來說,其中一項棘手的任務便是對於裂縫的辨識,而對此來說類別不平衡 是一大課題。背景與目標(裂縫)懸殊的占比阻礙模型達到更高的精確度,許多研究會使 用(Weighted Cross Entrophy, WCE) loss function 解決這個問題。但即便如此,如何找出 合適的權重也會是一項挑戰 Li(2021)等人的研究專注於處理類別不平衡的自適應損失 函數,使用經過些微調整的 Unet 網路如(圖 2.30),為裂縫偵測提出了3 個新設計的 WCE loss function,使 WCE 找出合適的懲罰項 q,除了提升辨識準確度外也可以加速訓練的 過程。

另外 Li 等人也蒐集了新的道路裂縫資料集 BJN260,再加上已公開的 3 個資料集 CrackForest, AigleRN, Crack360,總共使用 4 組資料進行訓練與驗證。下表(表 2-5)顯示 了不同損失函數作用於 CrackForest 的成果,在提升速度的同時也可以維持一定,甚至 更高的準確度。



圖 2.30 Unet 網路架構

表 2-5 損失函數成果比較表

Mathada	2		anash	time	e ander	ODS	10.2214		OIS	
wieulous	ρ	7	epoen	ume	P	R	F <sub>1</sub>	Р	R	F <sub>1</sub>
RSF [7]	3	12	20		87.75	72.65	79.49	89.04	76.73	82.42
		-	70	54min 54s	97.07 (0.22)	75.66 (1.21)	85.04 (0.72)	97.2 (0.16)	77.35 (1.14)	86.14 (0.66)
			20	15min 44s	97.36 (0.44)	71.12 (1.56)	82.19 (0.90)	97.26 (0.39)	74.80 (1.65)	84.55 (0.95)
wce_xie			10	7min 54s	98.12 (0.35)	64.49 (3.95)	77.75 (2.82)	97.53 (0.42)	68.46 (3.82)	80.39 (2.58)
			5	3min 39s	98.36 (0.46)	57.53 (4.69)	72.49 (3.68)	97.37 (0.43)	63.17 (4.68)	76.53 (3.47)
1000 00000	0.5	1/2	20	15min 44s	96.59 (0.34)	77.85 (0.79)	86.21 (0.40)	96.66 (0.34)	80.07 (0.79)	87.58 (0.36)
wce_power	0.5	1/2	10	7min 54s	96.52 (0.60)	76.66 (1.47)	85.44 (0.68)	96.73 (0.47)	79.64 (1.23)	87.35 (0.58)
	0.95	1/2	20	15min 44s	96.15 (1.07)	77.84 (1.27)	86.02 (0.45)	96.37 (0.88)	79.63 (1.13)	87.20 (0.42)
wce_power	0.85	1/5	10	7min 54s	96.62 (0.23)	76.62 (0.36)	85.47 (0.28)	96.71 (0.28)	79.24 (0.50)	87.11 (0.26)
I.	0.0		20	15min 44s	96.55 (0.22)	77.93 (1.25)	86.24 (0.70)	96.66 (0.26)	80.08 (1.20)	87.58 (0.63)
$wce\_tog$	0.9	-	10	7min 54s	96.30 (0.86)	76.72 (2.88)	85.37 (1.51)	96.52 (0.72)	79.36 (2.72)	87.08 (1.41)
			20	15min 44s	96.22 (0.73)	78.34 (1.39)	86.35 (0.61)	96.52 (0.55)	80.23 (1.15)	87.62 (0.48)
$wce\_exp$	0.75	1	10	7min 54s	96.62 (0.37)	76.83 (0.83)	85.59 (0.37)	96.84 (0.36)	79.44 (0.81)	87.28 (0.37)
	ACCORDAN		5	3min 39s	96.46 (0.40)	76.30 (1.53)	85.19 (0.83)	96.93 (0.40)	78.53 (1.52)	86.75 (0.80)
$0.75_{exp_{0.5}wj}$	0.75	1	10	7min 54s	96.62 (0.18)	78.18 (0.83)	86.42 (0.48)	96.95 (0.18)	79.87 (0.84)	87.58 (0.46)
0.75_exp_20_wj	0.75	1	5	3min 39s	96.19 (0.46)	76.97 (1.04)	85.51 (0.56)	96.48 (0.48)	79.43 (1.14)	87.12 (0.56)
$0.75\_exp\_50\_wj$	0.75	1	5	3min 39s	95.74 (1.25)	77.34 (1.77)	85.54 (0.70)	96.16 (1.12)	79.66 (1.72)	87.12 (0.68)

(7) SegNet

Badrinarayanan et al. (2017)提出一種深度全卷積神經網絡架構用於語義分割,並稱其為 SegNet(圖 2.31)。主要目標是瞭解道路和室內場景中目標的外觀、形狀和不同類別之間的空間關係,例如道路和人行道,因此在提取的圖像表示中保留邊界訊息格外重要。 SegNet 的架構如圖 2.31 所示,其中編碼器網路是由 13 個卷積層組成,這些卷積層對應於 VGG16 網絡中為對象分類而設計的前 13 個卷積層;而每個編碼器層都有一個對應的解碼器層,因此解碼器網路也有 13 個層。最終的解碼器輸出被饋送到多類別 Softmax分類器,以獨立產生每個像素的類別機率。



圖 2.31 SegNet 架構圖

研究使用 3,433 張影像進行訓練,並透過 CamVid 道路場景數據集對 SegNet 的性能進 行測試,此數據集並不大,僅有 600 張影像,而目標是將道路、建築物、汽車、行人、 標誌、桿子、人行道等 11 類別分類,同時也與另外 5 種網路進行分割結果比較,結果 如圖 2.32、表 2-6。在表 2-6 中,顯示各模型在不同訓練次數下的表現,值得注意的是 除 mIOU、BF 為其邊界劃定準確性評分指標,當以相同且固定的學習速率進行端到端 訓練時, SegNet 和 DeconvNet 的 BF 評分明顯更高。雖然 DeconvNet 與 SegNet 的指標 相匹配,但其計算成本更高同時也是所有網路中訓練時間最長的。整體而言, SegNet 與 其他競爭模型相比具有更高的準確度與效率。

Network/Iterations	27	4(	) K	1	27	80	) <mark>K</mark>	4	27	>8	80 K	1	Max iter
	G	С	mIoU	BF	G	С	mloU	BF	G	С	mloU	BF	
SegNet	88.81	59.93	50.02	35.78	89.68	69.82	57.18	42.08	90.40	71.20	60.10	46.84	140 K
DeepLab-LargeFOV[3]	85.95	60.41	50.18	26.25	87.76	62.57	53.34	32.04	88.20	62.53	53.88	32.77	140 K
DeepLab-LargeFOV-denseCRF[3]	(Marcale Carlos			not cor	nputed				89.71	60.67	54.74	40.79	140 K
FCN	81.97	54.38	46.59	22.86	82.71	56.22	47.95	24.76	83.27	59.56	49.83	27.99	200 K
FCN (learnt deconv) [2]	83.21	56.05	48.68	27.40	83.71	59.64	50.80	31.01	83.14	64.21	51.96	33.18	160 K
DeconvNet [4]	85.26	46.40	39.69	27.36	85.19	54.08	43.74	29.33	89.58	70.24	59.77	52.23	260 K

表 2-6 SegNet 與另 5 種方法之準確度比較表



圖 2.32 SegNet 與另 5 種方法分割結果圖

(8) FL-SegNet

在橋梁檢測中,裂縫和剝落是兩種最常見的損害,由於在圖像中裂縫、剝落和背景之間的比例不平衡,因此同時檢測多個缺陷是一項艱鉅的任務。Dong et al. (2019)提出一種 FL-SegNet 的訓練模型(圖 2.33),該模型通過減小權重分配給分類良好的樣本損失,並 採用焦點損失函數來解決尺寸不平衡的問題,將訓練重點放在較難分類的樣本上。





研究對隧道內部進行拍攝,最後一共獲得 1,879 張原始影像,為了增加樣本數,研究將 原始影像透過切割、變形、旋轉、模糊和添加噪訊的方式,擴增獲得 10,000 張影像的 數據集,並依照 75%和 25%的比例隨機將其分配到訓練集和測試集中。研究將其提出 的方法與兩流法(Two-stream method)及 Basic SegNet 進行比較,以瞭解 FL-SegNet 法的 有效性。詳細結果如圖 2.34 所示,其中紅色處為裂縫、綠色區域為剝落,圖 2.35 則顯示出在大小不平衡的多重損害識別上,FL-SegNet 與另外兩種方法相比,FL-SegNet 的 MPA 和 MIoU 分別提高了 11.99%和 4.88%。



圖 2.35 FL-SegNet 與另外兩方法之偵測準確度比較

(9) DeepCrack

Zou(2018)等人基於 SegNet 的模型架構提出了 DeepCrack 網路來預測影像中的裂縫,網路架構如圖 2.36。在 DeepCrack 中,融合多尺度特徵圖以獲得大尺度特徵圖的細節特徵和小尺度特徵圖中較抽象的特徵,如此一來,可以提高模型對於邊緣檢測上的性能。 Zou 等人使用了 4 個數據集,其中 CrackTree260 用於訓練,CRKWH100、CrackLS315 和 Stone331 則是用於測試。 DeepCrack 與其他現有模型之成果比較如表 2-7,可以看到即使在不同評估指數, DeepCrack 也擁有最高的分數,並高於 80%的準確度。DeepCrack 不像特定網路,例如: HED, RCF, SRN, SE 等,需要對預測成果進行後處理,因此使用上也具有一定的效率。



圖 2.36 DeepCrack 模型架構

表 2-7 DeepCrack 與其他現有模型之成果比較表

Methods	C	RKWH10	0	(	CrackLS31	5		Stone331		EDC
Methods	ODS	OIS	AP	ODS	OIS	AP	ODS	OIS	AP	113
HED [12]	0.8403	0.8851	0.9096	0.7633	0.7976	0.8289	0.7186	0.7627	0.7582	25
RCF [13]	0.8621	0.8909	0.9079	0.7878	0.8158	0.8285	0.7889	0.8287	0.8198	20
SegNet [20]	0.8184	0.8518	0.8496	0.7610	0.7951	0.7798	0.7938	0.8151	0.7874	7
SRN [34]	0.8602	0.8906	0.9037	0.7549	0.7885	0.7950	0.7353	0.7764	0.7409	17
U-Net [11]	0.8459	0.8539	0.9021	0.6718	0.7025	0.7401	0.7570	0.7763	0.8088	6
SE [24]	0.6888	0.7434	0.7646	0.4586	0.5210	0.4946	0.5574	0.6229	0.6050	5
CrackForest [46]	0.6468	0.6468	-	0.3917	0.3917	-	0.4410	0.4410	-	4
CrackTree [45]	0.6269	0.6269	-	0.6429	0.6429	-	0.6041	0.6041	-	0.5
DeepCrack	0.9095	0.9170	0.9315	0.8449	0.8671	0.8772	0.8559	0.8751	0.8883	6

(10) Deeply Supervised CNN

裂縫為常見的橋梁劣化特徵,也是主要的辨識類別之一。為提取多尺度的裂縫特徵和提 升模型區分裂縫、噪訊的能力,融合模型前階段大空間尺度的低階訊息與後階段小空間 尺度的高階訊息,這樣的多尺度特徵融合方法很常見於裂縫等劣化目標的辨識任務,如 圖 2.37 圖(a);而這樣 U 型結構的多尺度特徵融合方法可能存在一個問題,便是與低階 特徵融合的模型深層之高階特徵會逐層的被稀釋,導致模型最終退化成淺層網路。



圖 2.37 (a)FPN 架構 (b)Deeply Supervised CNN 架構

Qu(2021)等人為解決此問題,提出 Deeply Supervised CNN,直接將深層的特徵引入給 不同尺度的淺層特徵,如圖 2.37 圖(b)。而該模型架構主要分成 3 部分,如圖 2.38: (1) 基於 DeepLab 進行多尺度特徵提取 、(2)多尺度的特徵融合、 (3)Side network 輸出。



圖 2.38 Deeply Supervised CNN 架構圖

此架構有助於提高模型的收斂和裂縫檢測能力,學習幾何結構較複雜、難以被單尺度網 路捕捉的裂縫特徵。研究中 Qu 等人進行了消融實驗,證實多尺度的特徵融合(multiscale feature fusion module, MSFFM)和 Side network (SN)確實對模型的辨識成果有顯著效益, 如表 2-8。與其他現有的語意分割模型比較,如表 2-9, Deeply Supervised CNN 在 CRACK500和 DEEPCRACK 兩資料集都表現出最佳的 MIU 值,分別為 0.735 和 0.870, 顯示出更高的辨識準確度。

表 2-8 消融實驗成果比較

			101 0020		.erent o	onner	1000 /1111	, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,	CHOR DA	IN OLI I		
Sattings			CRAG	CK500					DEEPO	CRACK		
Seamgs	Р	R	F1	Pa	Ma	MIU	P	R	F1	Pa	Ma	MIU
DeepLabv3+	0.545	0.831	0.658	0.952	0.895	0.720	0.762	0.766	0.764	0.980	0.878	0.799
DeepLab + MSFFM	0.581	0.778	0.665	0.956	0.872	0.726	0.858	0.824	0.841	0.987	0.909	0.856
DeepLab + SN	0.586	0.763	0.663	0.957	0.866	0.725	0.844	0.818	0.831	0.986	0.906	0.848
DeepLab + MSFFM + SN(Ours)	0.654	0.698	0.675	0.963	0.838	0.735	0.867	0.850	0.858	0.988	0.922	0.870

ABLATION ANALYZE FOR THE PROPOSED ARCHITECTURE ON CRACK500 AND DEEPCRACK DATA SETS

表 2-9 模型成果比較

EVALUATION METRICS OF COMPETING METHODS ON CRACK500 AND DEEPCRACK DATA SETS

Mathada			CRA	CK500					DEEP	CRACK		
Methous	P	R	F1	Pa	Ma	MIU	P	R	F1	Pa	Ma	MIU
HED [17]	0.583	0.627	0.604	0.954	0.800	0.693	0.797	0.799	0.798	0.983	0.895	0.823
RCF [33]	0.587	0.593	0.590	0.952	0.794	0.684	0.832	0.799	0.815	0.985	0.896	0.836
U-Net [20]	0.641	0.641	0.624	0.957	0.808	0.704	0.826	0.783	0.804	0.984	0.888	0.828
SegNet [15]	0.564	0.624	0.592	0.952	0.798	0.685	0.800	0.768	0.784	0.982	0.880	0.813
CrackNet [34]	0.631	0.700	0.664	0.960	0.838	0.728	0.838	0.834	0.836	0.986	0.914	0.852
CrackSeg [32]	0.645	0.701	0.672	0.962	0.839	0.733	0.815	0.804	0.812	0.984	0.900	0.833
DeepCrack [14]	0.600	0.648	0.623	0.956	0.811	0.703	0.874	0.837	0.855	0.988	0.916	0.867
DeepCrack [16]	0.603	0.636	0.619	0.956	0.806	0.701	0.779	0.735	0.756	0.980	0.863	0.794
Ours	0.654	0.698	0.675	0.963	0.838	0.735	0.867	0.850	0.858	0.988	0.922	0.870

(11) ResNet

He et al. (2016)發現當網路越深時,就越容易出現退化問題,此現象代表隨著網路深度 的增加,精度將達到飽和並迅速退化,若將更多層添加到適當深度的模型中會導致更高 的訓練誤差,而且這種現象不是由過度擬合引起。降級將使得訓練準確性下降並表明並 非所有系統都同樣容易優化,因此他們設計出 Shortcut 模塊(圖 2.39)並應用到連續卷積 的普通網路中,提出一個殘差網路 ResNet。圖 2.40 中分別顯示普通網路 VGG-19、34 層普通網路以及 34 層殘差網路的訓練結構。

訓練以及測試方面,研究透過 ImageNet 2012 分類數據集測試網路性能,此數據集包含 1,000 個類別,訓練集和驗證集分別有 128 萬及 5 萬張影像,並使用另外的 10 萬張影 像進行測試,測試結果如圖 2.41 所示,可以明顯看出在普通網路測試中,34 層網路的 誤差比 18 層網路高;若改成殘差網路則 34 層網路的誤差明顯低於 18 層網路,從這個結果可以看到 ResNet 在深度網路中的訓練誤差較小,同時 Shortcut 模塊有能力解決退 化問題。



圖 2.39 shortcut 模塊結構圖



圖 2.41 ImageNet 2012 分類數據集測試結果圖

(12) CrackSeg

Song et al. (2020)認為儘管大多數公開的深度學習方法已經得到理想的結果,但仍然需 要在復雜背景下進行自動路面裂縫檢測。因此提出一種端到端的深度卷積神經網絡,稱 為 CrackSeg(圖 2.42),用於從復雜場景中的裂縫檢測。研究使用 ResNet 預訓練模型來 提取裂縫特徵,並在最終特徵表示中使用多尺度擴張卷積模塊獲得多尺度裂縫語義信 息。隨後將上採樣模塊將淺層和深層語義信息融合在一起,最後通過 Softmax 函數計算 每個像素屬於裂縫或非裂縫的機率。 在訓練資料方面,研究使用中國遼寧省的路面檢測影像。資料集內的影像包含不同路面 和燈光並有大量的裂縫,主要的目標為裂縫,因此只有裂縫和非裂縫兩個類別。訓練集 和驗證集分別由 4,736 張和 1,036 張組成,同時為了證明其方法的可行性,研究該網路 與 SegNet、U-Net、PSPNet、DeepCrack 以及 DeepLabv3+ 進行了比較。另外為了驗證 深度學習語義分割模型在裂縫檢測中的優勢,亦引入非深度學習方法的 CrackForest, 結果如圖 2.43、表 2-10 所示。

結果顯示 CrackSeg 的 mIoU 值達到最高 73.53%,其次是 DeepCrack 和 DeepLabv3+, 其中非深度學習方法的 CrackForest 有最低的 mIoU 且比 CreakSeg 低 14.27%。研究認 為性能提高主要歸因於在編碼階段使用多尺度擴張卷積模塊,該模塊捕獲多尺度上下 訊息以進行準確的語義挖掘,並通過連續的卷積運算獲得更準確的分割結果。



圖 2.42 CrackSeg 結構圖

表 2	2-10	CrackSeg	與另	6 種方	法之	準確度	比較表
-----	------	----------	----	------	----	-----	-----

Method	OA	Precision	Recall	F-score	mIoU
CrackForest	87.04	86.28	85.46	85.86	59.26
SegNet	96.64	96.86	97.08	96.97	70.56
U-Net	96.58	96.99	97.09	97.04	71.49
PSPNet	96.25	96.90	96.88	96.89	69.63
DeepLabv3+	96.83	97.01	97.64	97.32	71.77
DeepCrack	97.14	97.33	97.72	97.52	72.04
CrackSeg	98.79	98.00	97.85	97.92	73.53



圖 2.43 CrackSeg 與另 6 種方法分割結果圖

### (13) PSPNet

最新的語意解析框架主要基於全卷積神經網路,然而對於無限制的目標和多樣化的場 景仍十分具有挑戰性。Zhao et al. (2017)提出金字塔場景解析網路(Pyramid Scene Parsing Network, PSPNet)來實現場景感知,主要方式是結合深度學習的 ResNet 開發出有效的優 化策略,並試著提高複雜場景解析任務中,對目標以及環境的識別性能。PSPNet 架構 如圖 2.44 所示,研究首先以 ResNet 進行訓練,接著將特徵圖輸入金字塔解析模塊來收 集不同的子區域,然後進行上採樣和串聯,最後將存有上下訊息的特徵圖饋入卷積層以 獲得每個像素的預測。



研究使用 PASCAL VOC 2012 分割數據集進行性能實驗,該數據集包含 20 個目標類別 和 1 個背景類別。經過處理,訓練集、驗證集以及測試集的影像張數分別為 10,582、 1,449 和 1,456 張;此外也與另外 4 種網路進行比較,詳細結果如圖 2.45、表 2-11 所示, 表中分為上下兩部分,上半部表示未使用 MS-COCO 數據集進行預訓練;下半部表示 有進行預訓練。



圖 2.45 PSPNet 與另外 4 種網路對 PASCAL VOC 2012 影像分割結果圖

Method	aero	bike	bird	boat	bottle	bus	car	cat	chair	cow	table	dog	horse	mbike	person	plant	sheep	sofa	train	tv	mloU
FCN	76.8	34.2	68.9	49.4	60.3	75.3	74.7	77.6	21.4	62.5	46.8	71.8	63.9	76.5	73.9	45.2	72.4	37.4	70.9	55.1	62.2
Zoom-out	85.6	37.3	83.2	62.5	66.0	85.1	80.7	84.9	27.2	73.2	57.5	78.1	79.2	81.1	77.1	53.6	74.0	49.2	71.7	63.3	69.6
DeepLab	84.4	54.5	81.5	63.6	65.9	85.1	79.1	83.4	30.7	74.1	59.8	79.0	76.1	83.2	80.8	59.7	82.2	50.4	73.1	63.7	71.6
CRF-RNN	87.5	39.0	79.7	64.2	68.3	87.6	80.8	84.4	30.4	78.2	60.4	80.5	77.8	83.1	80.6	59.5	82.8	47.8	78.3	67.1	72.0
DeconvNet	89.9	39.3	79.7	63.9	68.2	87.4	81.2	86.1	28.5	77.0	62.0	79.0	80.3	83.6	80.2	58.8	83.4	54.3	80.7	65.0	72.5
GCRF	85.2	43.9	83.3	65.2	68.3	89.0	82.7	85.3	31.1	79.5	63.3	80.5	79.3	85.5	81.0	60.5	85.5	52.0	77.3	65.1	73.2
DPN	87.7	59.4	78.4	64.9	70.3	89.3	83.5	86.1	31.7	79.9	62.6	81.9	80.0	83.5	82.3	60.5	83.2	53.4	77.9	65.0	74.1
Piecewise	90.6	37.6	80.0	67.8	74.4	92.0	85.2	86.2	39.1	81.2	58.9	83.8	83.9	84.3	84.8	62.1	83.2	58.2	80.8	72.3	75.3
PSPNet	91.8	71.9	94.7	71.2	75.8	95.2	89.9	95.9	39.3	90.7	71.7	90.5	94.5	88.8	89.6	72.8	89.6	64.0	85.1	76.3	82.6
CRF-RNN <sup>†</sup>	90.4	55.3	88.7	68.4	69.8	88.3	82.4	85.1	32.6	78.5	64.4	79.6	81.9	86.4	81.8	58.6	82.4	53.5	77.4	70.1	74.7
BoxSup <sup>†</sup>	89.8	38.0	89.2	68.9	68.0	89.6	83.0	87.7	34.4	83.6	67.1	81.5	83.7	85.2	83.5	58.6	84.9	55.8	81.2	70.7	75.2
Dilation8 <sup>†</sup>	91.7	39.6	87.8	63.1	71.8	89.7	82.9	89.8	37.2	84.0	63.0	83.3	89.0	83.8	85.1	56.8	87.6	56.0	80.2	64.7	75.3
DPN <sup>†</sup>	89.0	61.6	87.7	66.8	74.7	91.2	84.3	87.6	36.5	86.3	66.1	84.4	87.8	85.6	85.4	63.6	87.3	61.3	79.4	66.4	77.5
Piecewise <sup>†</sup>	94.1	40.7	84.1	67.8	75.9	93.4	84.3	88.4	42.5	86.4	64.7	85.4	89.0	85.8	86.0	67.5	90.2	63.8	80.9	73.0	78.0
FCRNs <sup>†</sup>	91.9	48.1	93.4	69.3	75.5	94.2	87.5	92.8	36.7	86.9	65.2	89.1	90.2	86.5	87.2	64.6	90.1	59.7	85.5	72.7	79.1
LRR <sup>†</sup>	92.4	45.1	94.6	65.2	75.8	95.1	89.1	92.3	39.0	85.7	70.4	88.6	89.4	88.6	86.6	65.8	86.2	57.4	85.7	77.3	79.3
DeepLab <sup>†</sup>	92.6	60.4	91.6	63.4	76.3	95.0	88.4	92.6	32.7	88.5	67.6	89.6	92.1	87.0	87.4	63.3	88.3	60.0	86.8	74.5	79.7
PSPNet <sup>†</sup>	95.8	72.7	95.0	78.9	84.4	94.7	92.0	95.7	43.1	91.0	80.3	91.3	96.3	92.3	90.1	71.5	94.4	66.9	88.8	82.0	85.4

表 2-11 PSPNet 與其他網路對 PASCAL VOC 2012 各類別分割準確度比較表

結果顯示,僅使用 PASCAL VOC 2012 數據進行訓練時, PSPNet 的 mIOU 即可達到 82.6 %,且在所有 20 個類別中都獲得最高的準確性。當使用 MS-COCO 數據集進行預訓練 時,其 mIOU 更達到 85.4%且在 20 個類別中有 19 個獲得最高的準確度。整體而言, PSPNet 在該分類任務中的準確度優於其他方法,同時也在語意分割上得到令人滿意的 結果。

(14) Improved DeepLab V3+

在該研究中,Sun(2021)等人修改了 DeepLab V3+,使模型更好地適用於偵測裂縫和孔 洞。雖然對網絡進行修改,如圖 2.46 所示,仍保留了一些基本概念,並引入了新的子 架構以提高模型的效能。該模型使用的影像大小僅 256×256,與原始 DeepLab V3+網絡 架構使用的影像大小相比,影像長寬各減少了一半以減少模型運算成本。在編碼器中, 該模型使用 Xception-65 作為骨幹網絡來萃取特徵,然而在此之後,Sun 等人修改 ASPP 中空洞卷積的空洞率,從1、6、12、18 修改為1、2、4、8,使模型對於裂縫和孔洞等 小目標的檢測能更清晰、明確。

在 Improved DeepLab V3+中,引入了子架構 Squeeze-and-Excitation(SE) block,為每個 通道分配不同的權重。如前所述,ASPP 可以提取具有不同細節層次的特徵圖,但每個 特徵圖對識別結果的重要性並不相同; SE 架構可用於學習和賦予不同重要性的通道權 重,可以幫助網絡對信息特徵的學習更加敏銳。



圖 2.46 Improved DeepLab V3+模型架構圖

該網路架構之預測成果也與其他現有的語意分割模型進行比較,如表 2-12。研究提出 之 Improved DeepLab V3+不論在裂縫還是孔洞都高於另外兩個模型,FCN 和原架構之 DeepLab V3+網路,且其平均準確度高達 95.59%, MIoU 達 81.87%。達到了很優異的成 果。

N - I M N N N N
-----------------

Method	AP(%)	MAP(%)	MIoU(%)	
Proposed Deep Jahy2+	Crack: 97.63		01 07	
Proposed DeepLaov5+	Bughole: 93.53	95.58	01.0/	
ECN	Crack: 89.33	84.00	67.87	
ren	Bughole: 80.46	04.90		
Original DoopLaby2+	Crack: 95.43	02.58	70 05	
Original DeepLabv3+	Bughole: 91.73	93.38	10.05	

#### (15) Optimized Decoder

常見的語意分割模型具有 Encder-decoder 的架構, König(2021)等人認為現有的 Encoder(編碼器)已具有足夠良好的能力進行特徵萃取,因此設計出一種通用的 Decoder(解碼器)架構,使 Encoder 萃取出的特徵可以更完善的還原至原輸入影像大小, 架構圖如下圖 2.47。König 等人設計的 Decoder 可以連接在任意已經過預訓練的模型 後,例如:VGG, ResNet, EfficientNet 等。而由圖可以看出 Encoder 之解碼器須具備至少 5 層的下採樣層(Downsampling Layer)同時與該解碼器一同使用。



圖 2.47 Optimizes decoder 架構圖

König 等人總共使用了 5 組資料集進行訓練和測試,由表 2-13 可以看到,不論是對哪 組資料集,同時使用深度監督(Deep Supervision, DSV)模組和遷移訓練(Transfer Learning, TL)的成果會最好;而表 2-14 顯示使用不同預訓練模型與設計之 Decoder 成果,綜合不 同資料集成果來看,與其他預訓練模型相比,EfficientNet 系列模型可以表現得更好。

表 2-13 有無使用深度監督(DSV)模組和遷移訓練(TL)之成果比較表

Dataset	Metric	Ours + DSV + TL	V + TL Ours without DSV Ours with	
CT260 + CRKWH100	OIS	93.93±0.10	93.78±0.39	92.24±0.88
	ODS	93.06±0.12	92.74±0.42	91.35±1.08
CT260 + STONE331	OIS	89.30±3.36	81.76±5.93	62.01±39.74
	ODS	88.48±3.17	80.28±6.18	61.00±39.50
CFD	OIS	97.73±0.19	97.28±0.11	95.49±0.95
	ODS	97.07±0.28	96.49±0.22	94.54±1.14
DeepCrack-DB	OIS	88.91±0.16	88.64±0.17	88.34±0.15
	ODS	85.49±0.33	84.66±0.36	84.81±0.29

Backbone #Model		CT260 + CRKV	VH100	CT260 + Stone331		
	Params	015	ODS	015	ODS	
EfficientNet B0	12.5M	90.12±1.49	88.55±1.65	26.46±22.53	24.64±21.85	
EfficientNet B1	15.0M	92.90±1.32	92.03±1.45	87.43±3.44	86.48±3.35	
EfficientNet B2	16.7M	93.50±0.28	92.56±0.21	89.32±2.18	88.53±1.99	
EfficientNet B3	20.2M	93.93±0.10	93.06±0.12	89.30±3.36	88.48±3.17	
VGG 19	26.7M	93.11±0.19	92.59±0.25	91.56±0.67	90.05±0.94	
EfficientNet B4	28.1M	93.70±0.16	93.05±0.21	91.09±2.25	89.96±3.17	
ResNet 50	35.0M	93.60±0.06	93.16±0.13	86.17±1.46	86.04±1.45	
EfficientNet B5	39.8M	94.25±0.13	93.34±0.07	93.30±0.52	92.17±0.48	
Backbone	#Model	CFD		DeepCrack-DB		
	Params	015	ODS	015	ODS	
EfficientNet B0	12.5M	97.64±0.10	96.98±0.21	88.88±0.18	85.51±0.50	
EfficientNet B1	15.0M	97.60±0.16	96.90±0.15	89.03±0.17	85.61±0.31	
EfficientNet B2	16.7M	97.75±0.07	97.22±0.15	89.02±0.17	85.34±0.40	
EfficientNet B3	20.2M	97.73±0.19	97.07±0.28	88.91±0.16	85.49±0.33	
VGG 19	26.7M	96.53±0.29	95.75±0.31	88.10±0.15	84.65±0.22	
EfficientNet B4	28.1M	97.86±0.10	97.17±0.14	89.05±0.17	85.49±0.38	
ResNet 50	35.0M	97.92±0.09	97.37±0.18	88.68±0.17	84.73±0.39	
EfficientNet B5	39.8M	97.64±0.26	96.91±0.36	88.86±0.28	85.39±0.44	

表 2-14 使用不同預訓練模型與資料集之成果展示

(16) YOLO

Satoshi Anai(2021)將以下 6 種類神經網路進行比較,分別為 YOLOv3、RetinaNet-50、 RetinaNet-101、RetinaNet-152、SSD512、SSD300 還有 Faster R-CNN,在研究裡使用相 同的樣本,但是不同的類神經網路進行訓練模型後將訓練模型分成可辨識以下 5 種混 凝土惡化的模型,分別是裂縫、鋼筋外露;以及 3 種類型的游離氧化鈣。在 6 種類神經 網路中以 YOLOv3 的 mAP 91.1%為最高,其他的類神經網路表現約在 80%上下。 目前發佈的最新版本為 2020 年 4 月底所發佈的 v4,處理速度大大提升,並且這是全世 界目前最快最準的物體偵測演算法,YOLOv4 是研究團隊與俄羅斯開發者所共同研發。 YOLO (You Only Look Once)為 One-stage 的 Object Detection 演算法,可以一次性的預 測多個目標物位置及類別,並且擁有好的辨識速度,以及能夠實現 Real-time 偵測並維 持高準確度。YOLOv4 在 YOLOv3 的模型在多個部分做改進,可以使得辨識速度提升 的同時,大幅提高模型的辨識精度,並且降低硬體的使用要求。在 FSP=90,Yolov4 表 現的 AP 值為 42 比 Yolov3 的 32 提升 10%的辨識準確性,如圖 2.48 所示。



圖 2.48 YOLOV4 與 V3 效能比較

2. 劣化辨識深度學習相關文獻小結論

劣化辨識深度學習相關文獻在 2017 年之前的網路架構為以像元或區塊為基礎的卷積神經 網路,具有神經網路模型易訓練、辨識能力稍較穩定的優點,2017 年之後的網路架構的 主流改變為 Autoencoder 架構,具有影像整體辨識,辨識速度快、完整辨識物體、較少雜 訊的優點,由於劣化區域完整辨識與抗雜訊是計畫所需,因此本研究 AI 模型採用 Autoencoder 架構。另外大部分相關文獻所使用的影像訓練與驗證資料為影像空間尺度相 似、背景乾淨影像,這樣影像與本研究所處理的資料(影像空間尺度不一、背景雜亂)差異 甚大,需對於 AI 模型架構與損失函數進行調整。依循 Xu et al. (2019)、Qu et al. (2021)與 Sun et al. (2021)等裂縫區域辨識研究,本研究採用 DeepLab v3+為初始架構進行調整,調 整後使用的模型名稱為 DeepLab v3++,換言之,本研究所使用的模型為 DeepLab v3+的進 階版本。

#### 2.4 無人機橋下定位導航相關文獻分析

無人機於橋梁下進行檢測工作時, MnDOT 和 Collins Engineers 在初期使用了 Aeryon SkyRanger 這款無人機,發現其主要缺點為無法向上看,以及無法在 GNSS 覆蓋率低或沒有 GNSS 覆蓋的橋梁下方飛行。之後其發現 SenseFly Albris 無人機附有超聲波感測器和額外的鏡 頭且可以直接向上看,所以可在沒有 GNSS 的橋下飛行及進行橋梁檢測拍照作業。如何克服無 GNSS 訊號的橋下安全作業,將是無人機橋梁檢測是否能成功之重要關鍵技術之一。

據此一般都是採用室內定位技術,同時要建立一套絕對坐標系統,讓需要定位的設備(如 無人機)有可以參考及隨時修正的基準,其次其定位演算法與偵測儀器必須夠準確,兩者齊備 才能達到精準定位。有了坐標,無人機需要量測接收到的訊號強弱,便可使用三角定位法建立 自己的位置。而對於需要做出即時定位的無人機,移動方向與速度的計算就非常重要,這時慣 性感測器(Inertial Measurement Unit, IMU)對無人機軌跡的推算可改進定位精確度。此外做為提 供定位用的信標及偵測儀器,一般的室內定位可以有下列幾種裝置,包括 UWB、Marvelmind、 Bluetooth Beacons、Odometry、Magnitometers、WiFi RSSI、Laser Triangulation、Optical 等。對 於使用者來說,需要考量的是 GPS 的精確度、有效範圍、耐用性、物件尺寸、價格;而結合視 覺慣性里程計 (Visual Inertial Odometry, VIO)及 Mavelmind 的融合定位演算法,一般具有平滑、 精確、頻率高、全局無飄移等優點,定位誤差約為 10 公分,但是 Marvelmind 有容易受環境干 擾的缺點,所以本研究使用 VIO 及 UWB 的融合定位演算法。

使用多感測器估計狀態的算法已經被證明是有效且穩定的方法。在橋梁檢測的任務當中, 我們將使用體積小、價格較低的感測器,如相機、慣性感測元件(IMU)、GNSS 接收器、UWB 等,來達到在橋梁周圍的環境中即時狀態估計。融合多感測器的狀態估計算法的模型主要分成 兩種:基於濾波器的算法(Filtering-based)及基於優化的算法(Optimization-based)。濾波器的計算 量較低,但因為演算法假設狀態為高斯分布而受限;優化的算法由於進行迭代所以計算量高, 但優化的結果較為精準。近年來電腦的計算效能提升,因此優化的演算法也越來越受到應用及 研究的重視。上述兩種演算法分別又因為融合的對象不同分為鬆耦合(Loosely-coupled)與緊耦 合(Tightly-coupled)。鬆耦合是指各個感測器分別估計狀態再將估計結果進行融合,此演算法計 算量小,但對誤差敏感,累積誤差會越來越大。緊耦合則是將所有感測器的原始資料做為輸入 值,一同估計出一組狀態,但也因此增加計算量,但可以避免狀態間的誤差累計,提升精度。

相機與 IMU 的融合是最早開始被研究的,藉由 IMU 有較高的輸出頻率及較不會被外在環境干擾(如:相機容易受光照影響),讓融合結果可以有高頻及穩定的特性;而相機可以降低 IMU 的積分誤差、校正 IMU 的噪聲。

45

Weiss et al. (2012)及 Lynen et al. (2013)指出在濾波器的模型中,鬆耦合的算法為最簡單的 方法,此方法中 IMU 估計的狀態做為主要傳播(Propagation)的依據,而相機的狀態估計用於修 正(Update)融合結果。濾波器的模型中,緊耦合的算法中最廣為應用的算法是 MSCKF (Mourikis and Roumeliotis, 2007),這個方法不是單純將影像中可辨識的特徵點做為狀態進行估計,而是 將多個相機位姿以及當中共同被追蹤的特徵點做幾何約束。SR-ISWF (Wu et al., 2015, Paul et al., 2017)則是將 MSCKF 擴展,在狀態列中使用平方根的形式,進而提升計算效率以及避免不 穩定的數值特性。另外 ROVIO (Bloesch et al., 2017)也是其中一種緊耦合的濾波器算法。

優化算法中,鬆耦合的方式較少使用(Brunetto et al., 2015),並且效果沒有緊耦合好。緊耦合的算法則廣為研究如下:OKVIS (Leutenegger et al., 2015)、SVO (Forster et al., 2014, Forster et al., 2017)、VINS-MONO (Qin et al., 2018)、ORB-SLAM (Campos et al., 2021)。OKVIS (Leutenegger et al., 2015)為最早的算法,提出使用關鍵幀的滑窗系統進行後端非線性優化。SVO (Forster et al., 2014, Forster et al., 2017)使用半直接法進行影像中的特徵比對以獲取位姿,此方 案的運算速度快,但誤差較大。VINS-MONO (Qin et al., 2018)是使用關鍵幀的滑窗系統,另外 有自動初始化(Qin and Shen 2017)的過程, IMU 與相機的外參數標定,也具備閉環檢測、重定 位的功能。ORB-SLAM (Campos et al., 2021)在靜態環境中定位精準,但由於其特徵撷取的算法 效能使用較大,使得運行時幀數低。以上視覺慣性融合算法中,外參數校正(Rehder et al., 2016) 是很重要的,會直接影響到定位的精準度。此外,狀態的初始化(Qin and Shen, 2017, Huang and Liu, 2018)也是對於實時定位結果影響很大。在優化算法中,IMU 的資料使用上為了提升效能, 預積分(Forster et al., 2017)也被廣泛使用在各個算法中。預積分是指將積分中不變的項提出, 在優化位姿後可以減少重新計算的運算量。

在多感測器的融合算法中,Lynen et al. (2013)採用融合視覺、IMU 以及 GNSS 的鬆耦合濾 波器算法;Li et al. (2018)採用融合 UWB 及 IMU 的濾波器緊耦合算法;VINS-FUSION (Qin et al. 2019a, Qin et al. 2019b)採用鬆耦合的優化算法,提出了相機、IMU、以及融合 GNSS 的各 種感測器的殘差,並且具有擴展性,但由於是鬆耦合的算法,因此對誤差較敏感,結果較不穩 定。緊耦合的優化算法中,VIRAL SLAM (Nguyen et al. 2021)則是融合相機、IMU、UWB 以及 雷達;Omni-swarm (Xu et al. 2021)使用相機、IMU 及 UWB 來完成多機器人的群飛系統;GVINS (GNSS-Visual-Inertial Fusion) (Cao et al. 2021)則是將 VINS 延伸融合 GNSS 信號。

本研究計畫融合 VIO、GNSS 及 UWB 的感測訊號,並依 GVINS 算法延伸融合 UWB 的資料,以達到在有無 GNSS 的環境中,能有全局一致性的定位結果。

46

# 第三章 研究計畫方法及步驟

本研究111年主要工作為(1)建立各式橋梁(梁式橋、板橋、箱型梁橋)劣化類別資料庫,(2) 建立橋梁構件缺失影像辨識模式,(3)影像辨識成果驗證,(4)制定橋梁各構件拍攝作業標準, (5)制定無人機自動規劃飛行路線初步程序。

在建置深度學習模型之前,必須先挑選影像品質能清楚辨識各式劣化類別且劣化特徵相似 的影像,再以人工標註各式劣化類別,接著開發 AI 深度學習神經網路模型,進行各式劣化類 別的訓練學習與精度驗證。而後則是按照橋檢相關規範,在E 值已知的情況下,重新評定 DRU 值,將現有資料庫中的 DRU 值進行修正,以達到一致的判定準則。完成後建置第二種深度學 習模型後自動推估 DRU 值,最後於資料庫中選出 14 座橋梁影像與 DERU 等資訊,在經過資 料清洗與 DRU 的編修後,應用本研究建置之深度學習模型進行各式劣化類型之辨識與 DRU 之評等。此外在 112 年則會將無人機所拍攝之影像進行正射校正,再應用 111 年所建置之深度 學習模型進行各式劣化類型的自動 AI 辨識與 DERU 之評等,此時 E 值將利用劣化區之真實尺 寸,與橋梁 3D 模型中各構件之實際尺寸比較,得到劣化區相對於整個構件之百分比,再根據 橋檢規範設定 E 值與建立分類規則自動評定 DRU 值。

#### 3.1 車行橋梁管理資訊系統等資料清洗流程

本研究以橋梁管理資訊系統等資料庫當作深度學習之訓練與驗證資料,然而此資料庫中有 許多影像之 DRU 判定標準不一致的問題,不適合深度學習的訓練,因此必須先經過資料清洗 與挑選。圖 3.1 為本研究針對資料庫進行清洗之流程圖,以及後續深度學習相關訓練與驗證程 序。

依「公路橋梁檢測與補強規範」等,公路一般性橋梁之檢測構件種類數量共有 19 種,如表 3-1 所示。而表 3-2 則為強規範中 6 種橋梁檢測構件(主梁、橫隔梁、橋墩、帽梁、橋面板、橋 台、擋土牆)之劣化評等表,表中的 3 種劣化類型在本研究中分別稱為 Class1~3。

原始資料庫中包含3個資訊表單,分別是 damage\_photo、damage 與 der,本研究首先依據 上述6種構件之劣化評等表架構,將這這3個表單合併成以照片名稱為主之表單,再以程式將 所有照片依據6種構件名稱、3種劣化類型與D等於2,3,4進行分類整理,並分別儲存在各自 目錄中,以便後續人工挑選照片進行人工標註各式劣化類別,如圖 3.2 所示包括裂縫、剝落、 銹蝕、銹水、滲水、白華,分別以不同顏色標註,再以深度學習神經網路模型進行訓練與驗證 等。此外,本研究亦統計其他13種檢測構件,各種劣化類型的數量,並分析哪些劣化類型有 可能透過深度學習自動評等其劣化狀態。

47

由於資料庫所提供的 DRU 值與從單一照片所判斷之 DRU 值有落差,因此本研究除了參 考中華顧問工程司「劣化評等案例說明與演練」教材外,同時另外舉辦橋梁檢測專家會議,在 假設資料庫中E值為正確的前提下,制定統一的DRU 判識規則,再由專業人員協助一張一張 照片編輯與確認 DRU 值,因經過統一的評定規則進行編輯與確認後,才能以深度學習神經網 路進行學習與精度驗證。



圖 3.1 橋梁管理資訊系統資料清洗與深度學習訓練、驗證流程圖

(1)引道路堤	(8)橋梁排水設施	(15)伸縮縫						
(2)引道路堤護欄	(9)橋護欄	(16)主構件(主梁)						
(3)河道	(10)橋墩/橋基保護設施	(17)次要構件(橫隔梁)						
(4)引道路堤保護措施	(11)橋墩基礎	(18)橋面板						
(5)橋台基礎	(12)橋墩/帽梁	(19)其他						
(6)橋台	(13)支承/支承墊/阻尼裝置							
(7)翼牆/擋土牆	(14)防落設施							
註:								
1. 止震塊、拉桿、防落托架、剪力鋼棒等相關減震及防落措施,均為檢測項目(14)								
所涵蓋之範圍,惟隔減震	所涵蓋之範圍,惟隔減震支承應歸為第(13)項支承/支承墊/阻尼裝置之檢測項目							
2. 第(19)項其他為標誌設施	、照明設施、隔音牆、維修	走道等橋梁附屬設施。						

表 3-1 公路一般性橋梁之檢測構件



圖 3.2 人工標註 6 種劣化類別

表 3-26	種橋梁檢測構件之劣化評等表	
10 - 0		

定任 领刑	<b>米什堆</b> 伊	D./#	R待	11.48	少 /1- #5 and	2440	D/s	D /s	II /#
97 1G 88 (E	为16000000000000000000000000000000000000	2	2	2	为16颗型	为化状况	10 /10	<u>K 12</u>	12
	如果我是 这有珍小或所用的现代来	4	4	-	混凝土結構 裂缝	油饭泉塘,以有冷个戏剧剧游做况来。	2	1-2	1-2
混凝土結構	明顯影緣,但沒有染火或網筋夠認凡來	3	2	2-3		m 值 彩缝,但有 净小 筑 辆 殷 物 假况 承。 明 26 封 线 , 但 沒 古 淹 史 当 如 悠 妹 韩 明 象 。	3	2	2
裂缝	明顯裂缝,但有染水或細筋鏡鏡現象。		ana a	Decision.		可原来地 正次开诊小或用局所强先来。 明显到终,但在袭击着朝苏妹站用来。			
	展重装绘:	4	3-4	3-4		"明秋秋秋" 二角冷小战时的两位大水。	4	2-3	3
混凝土刻	混凝土刻落或破碎、鋼筋未外露或麵微外露。	2	1-2	1-2	深 祥 + 41	深石土制茨或破碎;铜筋未外震或韧微外震。	2	1-2	1-2
落、銅筋外	混凝土剥落或破碎、鋼筋明顯外露。	3	3	3	落、破碎、留	A 深凝土刻落或破碎, 钢筋明顯外露。	3	2	2
露、鋳蝕	大面積剝落、破碎或鋼筋嚴重腐蝕。	4	3-4	3-4	筋外露 · 线的	大面積刻落、破碎或銅筋嚴重腐蝕。	4	2-3	3
14 L L 44	<b>滲水及白華</b> 。	2	1-2	1-2		漆水及白華。	2	1-2	1-2
滲水、白華	<b>渗水及白孳且銹水流出。</b>	3	2-3	2-3	滲水、白華	渗水及白華且銹水流出。	3	2-3	2-3
	不影響行車安全的損傷劣化。	2	1-2	1-2		不影響行車安全的損傷劣化。	2	1-2	1-2
其他損傷	影響行車安全或造成第三者障礙。	4	3	3-4	其他損傷	影影行車安全或造成第三者障礙。	4	3	3-4
	表 C3.3.8 橋墩/帽梁/立柱劣化評等(RC	)				表 C3.3.11 橋面板劣化評等			
劣化频型	家化状况	D借	R值	し債	劣化類型	劣化狀況	D值	R值	U值
77 154 15	細樹裂綠,沒有染水或鋼筋鏡做現象。	2	2	2		细微裂缝,没有渗水或钢筋銹蝕現象。	2	2	2
	細襟裂缝,但有淬水或鋼筋錶蝕現象。	1 2	332			细微裂缝,但有渗水或钢筋銹蝕现象。			
混凝土結構	明顯對缝,但沒有渗水或鋼筋狭蝕現象。	3	2	2-3	混凝土結構	明願裂鐘,但沒有滲水或銅筋鋳蝕現象。	3	2	2-3
教徒	明顯裂缝,但有渗水或銅筋鉄蝕現象。		45.5	1917	裂雉	明頤裂缝,但有滲水或銅筋鋳蝕現象。		2.4	
	展重裂雄。	4	3-4	3-4		嚴重裂鐘。	4	3-4	3-4
混凝土剝	混凝土剥落或破碎、銅筋未外露或輕微外露。	2	1-2	1-2	混凝土制	混凝土剝落或破碎,銅筋未外露或輕微外露。	2	1-2	1-2
落、破碎、鋼	混凝土剥落或破碎、銅筋明顯外露。	3	3	3	落、銅筋外	洗凝土剝落或破碎,銅筋明顯外露。	3	3	3
筋外露、銹蝕	大面積剝落、破碎或鋼筋嚴重腐蝕。	4	3-4	3-4	露、鋳蝕	大面積剥落、破碎或銅筋嚴重腐蝕。	4	3-4	3-4
	<b>滲水及白華。</b>	2	1-2	1-2	A. K. 6 H	渗水及白華。	2	1-2	1-2
<b>苓水、白華</b>	渗水及白蓼且銹水流出。	3	2-3	2-3	渗水、日平	渗水及白藓且銹水流出。	3	2-3	2-3
	墩柱輕微傾斜或沉陷,尚不影響行車安全。	2	2	2	++ 15 45 /3	不影響行車安全的損傷劣化。	2	1-2	1-2
戲植傾斜。沉	· 橋面與欄杆有分離、下陷,恐影響行車安全。	3	2-3	2-3	-A-10-13 18	影響行車安全或造成第三者障礙。	4	3	3-4
10	倾斜或沉陷異常,嚴重影響行車安全。	4	4	4					-
The second second second	不影響行車安全的損傷家化。	2	1-2	1-2					
其他损傷	影響行車安全或造成第三者障礙。	4	3	3-4					
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				1	表 C3.3.7 翼膽/猶主膽劣化評等			
de tu da mi	4 / 4 / 4 / 2	D.#	D #	TT A	劣化類型	劣化状况	D伤	R值	U債
-516301至	方で収め	Dix	K 1K	0.1%	1100012	細微裂缝,沒有渗水或銅筋銹鹼現象。	2	2	2
	別放記述,没有渗水或剤筋烤使况素。	2	2	2		细微裂缝,但有渗水或钢筋銹蝕现象。		-	
见凝土结構	知微裂缝,但有渗水或钢筋锈蚀现象。	3	2	2-3	混凝土结构	明顯裂縫,但沒有滲水或銅筋鋳蝕現象。	3	2	2-3
裂缝	明頻裂缝,但沒有滲水或銅筋銹蝕現象。				教燈	明顯裂缝,但有滲水或銅筋鋳蝕現象。		2.4	2.4
	明颐裂缝,但有渗水或钢筋铸酸现象。	4	3-4	3-4		嚴重裂縫。	4	3-4	5-4
	嚴重裂縫。	-			混凝土制	混凝土剥落或破碎,銅筋未外露或輕微外露。	2	1-2	1-2
包凝土制	混凝土剥落或破碎,钢筋未外露或鞍微外露。	2	1-2	1-2	落、破碎、颦	用混凝土剝落或破碎,銅筋明顯外露。	3	3	3
东、破碎、銅	混凝土刻落或破碎,銅筋明顯外露。	3	3	3	筋外露、銹包	k 大面積剝落、破碎或鋼筋嚴重腐蝕。	4	3-4	3-4
高外露、銹蝕	大面積剝落、破碎或銅筋嚴重腐蝕。	4	3-4	3-4	*** . 4 %	渗水及白苹。	2	1-2	1-2
44.4%	渗水及白華。	2	1-2	1-2	18.12.19.40	渗水及白華且鎬水流出。	3	2-3	2-3
5小、日平 5	渗水及白華且銹水流出。	3	2-3	2-3	其他指导	不影響行車安全的損傷劣化。	2	1-2	1-2
	不影響行車安全的損傷劣化。	2	1-2	1-2	ST ICIDE NO	影響行車安全或造成第三者障礙。	4	3	3-4
他損傷									

### 3.2 確認可行之影像辨識方式

本研究所研擬之橋梁構件劣化影像辨識深度學習模型架構如圖 3.3 所示,其中包含兩種深 度學習模型,分別為劣化區域辨識模型與 DRU 推估模型。劣化區域辨識模型用於辨識劣化在 影像中的區域,DRU 推估模型則從影像與劣化區域推估 DRU 數值,這兩個深度學習模型將分 別於後續章節說明。



圖 3.3 橋梁構件劣化影像辨識深度學習模型架構

#### 3.3 建立自動辨識橋梁構件劣化類型深度學習模式

本研究針對橋梁各式劣化類型進行偵測與辨識,使用已經在影像語意分割領域中有相當成 果的 DeepLab v3+ (Chen et al., 2018) 深度學習網路結構為基礎,調整其網路結構以發展適合微 小且細長混凝土裂縫以及其他劣化類型的影像語意分割。Chen et al. (2018)認為空間金字塔池 (Atrous Spatial Pyramid Pooling, ASPP)和編碼解碼器(Encoder-Decoder)的結構適合用於影像語 義分割任務,空間金字塔池模塊、編碼及解碼器結構以及兩者結合的概念如圖 3.4 所示,前者 可以通過多種速率和多個有效視場進行合併操作來探查傳入的特徵,從而捕捉豐富的上下文訊 息;後者則可以通過逐漸恢復的空間信息來捕獲更清晰的邊界。故以 DeepLab v3 (Chen et al., 2017)為基礎加以修改形成 DeepLab v3+網路結構,圖 3.5 的 DeepLab v3+網路結構圖可看到其 編碼解碼器的結構內容,編碼器使用 DeepLab v3 結構,在第4 個分段後連接改良的空間金字 塔池模塊,隨後將所得的特徵圖合併,再使用核心大小 1×1 的卷積層得到 256 個通道的特徵 圖;解碼器方面,特徵圖首先上採樣 4 倍,然後與編碼器中對應分辨率低階特徵合併,而在合 併前,由於低階特徵圖的通道數通常會比從編碼器中得特徵圖多,因此為了避免淡化語義信息, 增加訓練上的難度,故於合併前需要將低階特徵圖通過1×1的卷積減少通道數,並在合併後使用3×3的卷積改善特徵,最後上採樣4倍恢復到原始影像大小。



圖 3.4 空間金字塔池模塊與編碼解碼器結構圖



圖 3.5 DeepLab v3+網路結構圖

1. 空間金字塔池

主要是由空洞卷積(Atrous Convolution)以及深度可分離卷積(Depth-wise Separable Convolution)來完成,以下分別介紹兩種卷積:

(1) 空洞卷積

利用添加空洞來擴大感受野(Receptive Field)的卷積方法,從而捕獲多尺度訊息,用來解決語義分割任務中,下採樣會降低圖像分辨率並丟失訊息的問題。說明空洞卷積運作方

式,以核心大小 3×3 的空洞卷積展示不同空洞率之卷積情況,以及其相對應的感受野, 其中紅點表示將與 3×3 通道發生卷積之位置,而感受野的範圍以不同顏色表示,顏色越 深表示感受到的次數越多。圖 3.6 (a)空洞率為 1,與普通的卷積操作一樣;圖 3.6(b)空 洞率為 2,感受野增大為 7×7;圖 3.6(c)空洞率為 4,感受野達到 15×15。空洞空間金字 塔池化的範例如圖 3.7 所示,當一張特徵圖輸入後,將由四種空洞率的深度可分離卷積 進行卷積處理,而它們的空洞率分別為 6、12、18 和 24,實務上,會在完成後將各個 深度可分離卷積的結果以逐點卷積進行合併。



圖 3.6 空洞卷積運作圖(左圖)與空洞率與感受野示意圖(右圖)



圖 3.7 空洞空間金字塔池化

(2) 殘差網路模組

更深層的網路具有更強的非線性化能力,然而以單純疊加卷積的方式去加深網路並不 會帶來更好的辨識成果,因為牽涉到「退化」的問題。隨著層數越多,參數越複雜,模 型的泛化能力可能反而會變弱,且大量的非線性變化會讓模型失去部分原有訊息的特 徵而造成退化。He et al., (2016)提出殘差網路模組(如圖 3.8),利用恆等映射的概念解 決退化的問題。當殘差等於 0,也就是說後層的輸出沒有學到新的資訊時,則輸出會等 於輸入,如此一來即便模型沒有學到新的特徵也不會退化;而每個網路模組可學到新的 特徵,透過不斷疊加可以進而使模型捕捉到更多資訊。可注意到的是在深層網路中會使 用圖 3.8 右半部的殘差網路模組結構,減少輸入和輸出的維度資訊,降低運算耗費的時 間與模型大小,提高運作的效率。



圖 3.8 殘差網路模組結構



圖 3.9 Xception-65 結構圖包含輸入階段、中層結構與輸出階段

深度卷積神經網路是指在進入空洞空間金字塔池化前的卷積結構,主要目的是用來進 行特徵的提取,其網路結構與許多能有效進行語意分割任務類似,在 DeepLab v3+中此 部分被視為骨幹,歸類為基礎網路。DeepLab v3+以 Xception-65 模型作為骨幹取代 DeepLab v3 的 RestNet101, Xception-65 模型是修改自 Xception 模型,由圖 3.9 可以看 到在主要結構上包含輸入階段、中層結構以及輸出階段,同時主要的卷積方式為深度可 分離卷積,並藉由逐點卷積來避免退化。

Xception-65 是一個僅有 65 層卷積層的淺層網路結構,且可由圖看到 Xception-65 做了 多次步長為 2 的降解析度處理,這在偵測小目標及邊界上會造成很大的失利。對於本研 究使用的人工拍攝橋梁資料亦或是 UAV 拍攝橋梁來說,由於拍攝距離遠近不一,所獲 取的影像空間解析度變化大;此外欲偵測的目標物大小不一,以空間解析度為 0.2 mm/pixel 的影像為例,混凝土裂縫寬度窄且細長,有些裂縫在影像上寬度不到 5 個像 元,而橋梁工作縫較寬,在影像上超過 20 像元,研究使用的又是真實世界的複雜背景 影像。因此淺層的神經網路沒有足夠的能力去萃取出目標物特徵,研究以 DeepLab v3+ 網路架構為基礎,將骨幹網路替換成空洞殘差網路(Dialated Residual Network, DRN) (Yu et al., 2017)。本研究使用的是總層數有 102 層的 DRN 網路 – DRN102(如圖 3.10),同樣 是基於 ResNet 進行改良之深層網路,不同於 ResNet101 和 Xception-65, DRN 在加深 網路的同時仍考量到保留空間解析度與上下文訊息。



圖 3.10 空洞殘差網路 DRN 架構圖(Yu et al., 2017)

由圖 3.10 可看到 DRN 模型的修改歷程, DRN-A 為原始 ResNet 結構,最終的 DRN 架 構為最下面一列之 DRN-C。為了保留空間解析度,DRN-C 移除原 ResNet 架構中的下 採樣與全局平均池化層,同時為不因此而讓後段的卷積失去感受野而分別在階層 5、6 和7使用了空洞分別為2、4和2的空洞卷積,保留住上下文訊息,然而使用空洞卷積 可能會造成網格效應(如圖 3.11)。


圖 3.11 空洞卷積之網格效應

為解決此問題,Yu et al. (2017)首先是移除 7×7 卷積層後的最大池化層。經最大池化層 處理後會產生高振福且高頻的激活特徵圖,此類的特徵圖會加劇網格效應,因此Yu 等 人將之移除,替換成一般的卷積層。接著在網路的後段階層加上卷積模組,此舉的目的 近似於使用對應頻率的濾波器以減輕輸入特徵圖的高頻內容,同樣能降低網格效應,可 注意到的是最後在階層 7、8 增加的並非殘差卷積模組,這是由於殘差連接會將階層 6 殘留的網格效應傳播至後段的特徵圖,因此最後將其移除掉,僅剩一般的卷積層。在本 研究使用的 DRN 模型中,最後為加深網路,也是提高模型抽象化萃取特徵的能力,在 階層 3、4、5和6的殘差卷積模組分別重複了 3、4、6和3次,如圖 3.12 下半部。 DRN 網路在設計上保留解析度與上下文訊息的架構對此研究來說格外重要,尤其是在 本研究需偵測如裂縫這樣細小且連續的劣化目標。若是在萃取特徵的過程中過於使用 下採樣而降低解析度,會使模型失去太多細節資訊,容易造成目標物的邊界和細小劣化 無法被準確偵測等漏授的產生。然而,不以下採樣處理則會降低模型後段的卷積層的感 受野,使特徵圖失去必要的上下文資訊。而 DRN 以帶有空洞率的卷積權衡了這兩點, 並且克服使用空洞卷積會帶來的網格效應,讓輸出的特徵圖可同時保有豐富的上下文 訊息與更高的解析度。修改的 DeepLab v3++總體架構如圖 3.12。



圖 3.12 本研究所使用的 DeepLab v3++網路結構圖

2. 訓練資料增廣

一個深度學習網路模型的未知參數高達數十萬至數百萬數量,需要求解的未知參數數量龐 大的,若是有標記的訓練資料數太少,模型容易出現過擬合(Overfitting)的情況,也就是該 模型在訓練的資料集能夠有優秀的表現,卻無法在其他資料集表現出同等的成果。資料增 廣是能有效克服資料數不足、增加模型泛化(Generalization)能力的方法。使用無人機拍攝 的一組涵蓋整座橋梁的完整影像中,只有約 1/3 的影像會出現需要辨識的劣化,這樣的資 料數量及多樣性不足以建構一個良好的深度學習網路,因此我們需要引入資料增廣的方式 以提升資料的數量與多樣性。欲使用的資料增強函數包含:

- (1) 裁剪 (Cropping): 將原始影像裁切成固定大小,例如: 512×512。
- (2) 旋轉 (Rotation): 將同樣的影像以不同的角度旋轉以提升資料量,由0°到45°隨機選一數 值進行旋轉。
- (3) 翻轉 (Flipping): 將影像以水平及垂直的方向翻轉以實現資料擴充。
- (4) 亮度 (Brightening): 調整影像亮暗度, 增強模型對於不同光線條件之劣化影像辨識能力。
- (5) 飽和度 (Saturation): 調整影像飽和度, 增強模型對於不同飽和度影像之辨識能力。
- (6) 銳化 (Sharpening): 調整影像的銳化度,增強模型對於不同銳化度影像之辨識能力。
- (7) 對比度 (Contraction): 調整影像的對比度, 增強模型對於不同對比度影像之辨識能力。
- (8) 高斯模糊 (Gaussian-Blurring): 以 0~3 個像素的模糊半徑對影像進行模糊處理, 增強模

型對於模糊影像的劣化辨識能力。

- (9) 高斯噪聲 (Gaussian Noise): 添加高斯分布的噪訊給影像,提高模型對於具雜訊影像的 辨識能力。
- (10) 縮放裁切 (Scale-Crop): 在影像縮放後再裁切成512×512的大小。
- (11) 裁切組合 (Cutmix): 從資料集中隨機選取四張影像進行裁切後,合併成一512×512大小之新影像,如圖 3.13。



圖 3.13 Cutmix 成果圖

針對不同的劣化辨識模型,會採用的資料增強函數也不盡相同。以需辨識滲水的模型為例, 滲水有由上往下、高處往低處流動而殘留痕跡的特徵,若是使用垂直方向的翻轉或是旋轉, 會讓影像失去該特徵,因此對該模型來說,便不適合應用垂直方向之翻轉和旋轉等兩種資 料增強函數;另縮放裁切(Scale-Crop)與裁切組合(Cutmix)僅適用於裂縫,對裂縫以外的其 他劣化來說,其所占影像的比例可能已經很大,若是再進一步進行縮放與裁切,可能會讓 處理後的影像被該劣化完全占滿,而此舉對影像的辨識能力亦無益處,因此不適用於裂縫 以外的其他劣化類型。上述所有的資料增強技巧,在訓練過程中皆是隨機的決定是否執行, 增強每個批次輸入資料的多樣性與隨機性,如表 3-3。

	裂縫	銹蝕	剝落	白華	滲水
使用之增强函数	裁剪、旋	裁剪、旋	裁剪、旋	裁剪、旋	裁剪、旋
	轉、翻轉、	轉、翻轉、	轉、翻轉、	轉、翻轉、	轉、翻轉、
	亮度、飽和	亮度、飽和	亮度、飽和	亮度、飽和	亮度、飽和
	度、銳化、	度、銳化、	度、銳化、	度、銳化、	度、銳化、
	對比度、高	對比度、高	對比度、高	對比度、高	對比度、高
	斯模糊、高	斯模糊、高	斯模糊、高	斯模糊、高	斯模糊、高
	斯噪聲、縮	斯噪聲	斯噪聲	斯噪聲	斯噪聲
	放裁切、裁				

表 3-3 各劣化類別使用之增強函數對應表

	切組合				
--	-----	--	--	--	--

3. 深度學習網路超參數最佳化

類神經網絡模型的參數可以分為兩類:模型參數(Model Parameter)與超參數(Hyper-Parameter),訓練中通過梯度下降演算法進行更新的參數稱為模型參數,而模型結構與模型 訓練相關的參數稱為超參數,例如:最佳化演算法學習率、訓練資料批次大小(Batch size)、 卷積層濾波器數量、全連接層神經元數量。深度學習模型性能部分依賴超參數的選擇,因 此超參數優調或是最佳化是一項重要的步驟。超參數最佳化的目標則是找到一組最適當的 模型結構超參數與模型訓練超參數,藉著最適當的模型架構來得到較佳的辨識結果。圖 3.14 為超參數最佳化的概念圖,一組超參數組合可以建立成一個神經網路架構,該組神經 網路將會以訓練資料集進行模型訓練,以驗證資料集給予損失函數,使超參數組合透過一 定的調整策略產生新的組合,直到找出最佳的超參數。訓練模型的輸出結果則會取決於訓 練資料集與超參數的設定,在資料集固定的情況下,超參數設定將會影響最終結果。



圖 3.14 類神經網路模型超參數最佳化流程

超參數最佳化搜尋方法分為無模型搜尋方法與基於模型搜尋方法。無模型搜尋方法為早期 的搜尋方法,其概念以窮舉法(Exhausted Search)為延伸,例如網格搜尋法(Grid Search)與隨 機搜尋法(Random Search)(Feurer and Hutter, 2019),由於深度學習的超參數範圍與數量多, 無法在有效時間內透過此方法測試出所有超參數的好壞。無模型搜尋方法為透過簡單的設 定來增加搜尋的廣度,例如將候選解平均地分散於解空間中,或以事先設定的資料分布來 進行搜尋。無模型搜尋方法每一次搜尋的超參數組合都會得到一組相應的模型準確率,但 模型並不會分析當下給予超參數組合的優劣,也不會給予下一次搜尋的方向,僅以事先設 定好的超參數進行下次的超參數調整,直到指定的條件到達,並輸出最佳模型。基於模型 搜尋方法其概念是透過加入決策模型作為超參數的調整依據,在超參數的搜尋過程,基於 模型搜尋方法會依照決策模型來決定該次迭代所要使用的超參數組合,並利用模型給予的 準確率計算結果來改變下次的超參數調整策略,最後給予所有搜尋經驗中取得的最佳預測 模型。雖然此方式的計算成本可能因為需要透過模型來調整超參數而增加,但同時也能大 幅增加搜尋的廣度,以及降低落入區域性最佳解的機率,進而提高預測模型的準確率。本 研究擬採用的基於模型搜尋方法為貝葉斯最佳化(Bayesian Optimization) (Snoek et al., 2012), 使用一數學分布模型來決定下個迭代要計算的區域或地點,並在每次的迭代都選擇進步空 間最大的區域來搜尋,以高效率的獲取最佳的超參數的最佳解。

4. 不同劣化類型辨識

本研究辨識之橋梁劣化類別有混凝土結構裂縫、混凝土剝落、銹蝕、滲水、白華、銹水等。 因滲水、白華、銹蝕和混凝土剝落在影像中以區塊呈現,而混凝土裂縫與銹水在影像中呈 現長線條但不同線結構的樣貌。如所有劣化類型皆使用單一影像語意分割深度學習模型來 分類與辨識,將提高模型混淆機會及降低分類可靠度與精度,因此本研究依據形狀相似度 將橋梁各式劣化類型分為上述兩類,每一類各自訓練一個 DeepLab v3++ 模型,以下說明 這3類橋梁劣化模型與其辨識範圍。

(1) DeepLab v3++ 模型 A(類型:混凝土結構裂縫與銹水):

混凝土結構裂縫、銹水與其他劣化類型相比,在影像上所占的面積較小、結構細長、形狀不一,因此在模型訓練時易因類別不平衡導致無法被良好的辨識,為提升裂縫與銹水的辨識準確度,單獨設計一 DeepLab v3++模型進行訓練,其中橋梁裂縫的範例影像顯示在圖 3.15。



圖 3.15 橋梁之裂縫(左)與銹蝕影像(右)

(2) DeepLab v3++ 模型 B (類型: 滲水、白華、銹蝕、剝落):
 此類型為形狀相似的劣化類型,滲水、白華、銹蝕、剝落在影像中以區塊呈現,圖 3.16
 為白華、滲水、銹水、剝落範例影像。



圖 3.16 橋梁白華、滲水、銹蝕、剝落範例

本研究將銹水單獨歸出一類進行辨識係因在公路橋梁檢測及補強規範中,在附錄的劣 化評等表格內,以表 C3.3.5(圖 3.17)為例,可在劣化類型為滲水、白華一列中看到,若 是劣化狀況出現銹水則 DRU 指數可能會因此上升,因此列為亦需辨識出的一項劣化狀況。

		20		
劣化類型	劣化狀況	D 值	R 值	U值
	細微裂縫,沒有滲水或鋼筋銹蝕現象。	2	2	2
田岛上针楼	細微裂縫,但有滲水或鋼筋銹蝕現象。	3	2	23
化炭工炉伸列络	明顯裂縫,但沒有滲水或鋼筋銹蝕現象。	3	2	2-3
衣艇	明顯裂縫,但有滲水或鋼筋銹蝕現象。	1	2 1	2 1
	嚴重裂縫。	4	3-4	3-4
混凝土剝	混凝土剝落或破碎,鋼筋未外露或輕微外露。	2	1-2	1-2
落、破碎、鋼	混凝土剝落或破碎,鋼筋明顯外露。	3	3	3
筋外露、銹蝕	大面積剝落、破碎或鋼筋嚴重腐蝕。	4	3-4	3-4
滲水、白華	滲水及白華。	2	1-2	1-2
	滲水及白華且銹水流出。	3	2-3	2-3
其他損傷	不影響行車安全的損傷劣化。	2	1-2	1-2
	影響行車安全或造成第三者障礙。	4	3	3-4

表 C3.3.5 橋台劣化評等

圖 3.17 劣化評等表 C3.3.5

滲水多為伴隨裂縫及白華滲出的水痕,於混凝土橋上多為黑色;而銹水則是參雜了生銹 的成分,連同水分一起滲出表面的水痕,色調偏紅,而滲水和銹水兩者在視覺上有明顯 的顏色差距,再加上銹水的出現會對評等有影響,因此在語意分割模型中將兩者各分成 一類來辨識,範例影像如表 3-4。



表 3-4 銹水、滲水影像

5. 影像辨識成果驗證

影像辨識成果驗證流程顯示於圖 3.18,由「車行橋梁管理資訊系統(原臺灣地區橋梁管理資 訊系統)」中選定 14 座橋梁(其中包含梁式橋、板橋、箱型橋)的檢測影像資料,影像資料對 於檢測目標物需有足夠的空間解析度以進行判識,選定的檢測影像資料進行人工數化以獲 取橋梁構件位置,以及劣化區域與類別的地真資料,選定的檢測影像放入訓練好的橋梁構 件,以及劣化偵測深度學習模型進行推演與判識,判識結果與人工數化的地真資料進行比 對,輸出辨識精度報告。



圖 3.18 影像辨識成果驗證流程

深度學習模型判識結果與人工數化的地真資料進行比對並繪製混淆矩陣,如表 3-5,隨後 使用各項精度指標進行評估,包含總體準確度(Overall Accuracy, OA)、平均使用者精度 (Mean User's Accuracy, UA)、平均生產者精度(Mean Producer's Accuracy)、平均交併比(Mean Intersection over Union, MIoU)、加權交併比(WIoU)、目標類別交併比(IoU for Target)、召回 率(Recall, R)、精確率(Precision, P)、Kappa 值(K)、F1(F)、漏授誤差(Omission Error, OE)和 誤授誤差(Commission Error, CE),以下分別介紹各項精度指標。

表 3-5 混淆矩陣說明表

	模型預測為正類(Positive)	模型預測為負類(Negative)
真實情況為正類 (Positive)	真正類(True Positive, TP)	偽負類(False Negative, FN)
真實情況為負類 (Negative)	偽正類(False Positive, FP)	真負類(True Negative, TN)

(1) 總體準確度(OA):所有預測正確的像素占總像素的比例,即真正類與真負類之和占總 像素的比例,一般情況下可直接解釋模型的預測能力,屬於重要的評估指標,其公式如 下:

$$OA = (TP + TN)/(TP + FN + FP + TN)$$

(2) 平均使用者精度(MUA):指在預測圖上,像素正確分類為該類別的機率,各類別像素被 正確分類的機率進行平均而得,其公式如下:

$$MUA = \left\{\frac{TP}{(TP + FP)} + \frac{TN}{(TN + FN)}\right\}/2$$

(3) 平均生產者精度(MPA):指地真資料被正確分類的機率,由各類別的地真資料被正確分類的機率進行平均而得,其公式如下:

$$MPA = \left\{\frac{TP}{(TP + FN)} + \frac{TN}{(TN + FP)}\right\}/2$$

(4) 平均交併比(MIoU):將地真資料與預測資料作為兩個集合,計算此二集合的交集和聯 集之比便為交併比。k為類別數,求每個類別的交併比再做平均,便為平均交併比,其 公式如下:

$$MIoU = \frac{1}{k+1} \sum_{i=0}^{k} \frac{TP}{FN + FP + TP}$$

(5) 加權交併比(WIoU):可視做平均交併比的進階運算,分別計算各類的交併比後乘上對 應權重。權重 w 為該類別出現在資料集中的占比,能反應出總體成果的表現,其公式 如下:

WIoU = 
$$w \times \left(\frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN} + \text{FP}}\right) + (1 - w) \times \left(\frac{\text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FN}}\right)$$

(6) 目標類別交併比(TIoU):單獨計算前景類別的交併比,其公式如下:

$$TIoU = TP/(TP+FN+FP)$$

(7) 召回率(R):計算真正類占所有應被預測到之正類的比例,意即真實情況為正類中有多 少是有被正確預測的,此指標比較在意真實情況為正類的答對數量,解釋該模型尋找主 要目標類別的能力,其計算公式如下:

$$R = TP/(TP+FN)$$

(8) 精確率(P):計算真正類占所有預測為正類的比例,意即真正類中有多少是預測正確的, 此指標較在意模型預測為正類的答對比率,解釋該模型在預測主要目標類別的準確度, 其計算公式如下:

$$P = TP/(TP+FP)$$

(9) Kappa 值(K):一致性檢驗指標,當一致性越高時,代表模型預測結果越好。根據其值 可進一步分為5個等級:小於0.2屬於低一致性;介於0.2至0.4之間為一致性尚可;介 於0.4至0.6屬於一致性普通;介於0.6至0.8屬於高一致性;0.8以上則評為幾乎一致。 其計算公式如下:

$$PO = (TP + TN)/(TP + FN + FP + TN)$$
$$PE = \frac{(TP + FP) \times (TP + FN) + (FN + TN) \times (FP + TN)}{TP + FN + FP + TN}$$
$$K = (PO - PE)/(1 - PE)$$

(10) F1 分數(F):是召回率和精確率的一種調和平均數(Harmonic Mean),可視為兩者的綜合 指標,能較全面評估模型,其計算公式如下:

$$\mathbf{F} = (2 \times \mathbf{R} \times \mathbf{P})/(\mathbf{R} + \mathbf{P})$$

(11) 漏授誤差(Omission Error, OE):目標類別中被遺漏辨識的樣本占該類別總樣本數的比例, 其計算公式如下:

$$OE = FN/(TP + FN)$$

(12) 誤授誤差(Commission Error, CE):預測成果中,不屬於該類別樣本數占該類預測成果樣本數的比例,其計算公式如下:

$$CE = FP/(TP + FP)$$

## 3.4 建立自動評定 DRU 值深度學習模式

DRU 推估深度學習模型的輸入資料為帶有劣化機率影像與橋梁構件檢測的 E 值,模型輸 出資料為橋梁構件檢測的 DRU 之 3 個數值。帶有劣化機率影像是由兩影像融合而成,這兩影 像分別為原劣化影像與劣化區域辨識深度學習模型所輸出的劣化區域機率值,影像融合原定為 可學習參數的影像融合,目前的作法簡化為線性影像融合,目的在凸顯影像的劣化區域範圍, 線性影像融合的例子如圖 3.19 所示。



圖 3.19 裂縫線性影像融合例子,原劣化影像與劣化區域機率值融合

DRU 推估深度學習模型的骨幹網路為 Vision Transformer (Dosovitskiy et al., 2021), 輸入影 像大小為 600x600。近幾年 Transformer 深度學習架構相當多,但與標準的卷積神經網絡在準 確度與速度方面提升有限, Transformer 從語音訊號轉移至電腦視覺領域沒有大方異彩的原因 為計算量大,其計算複雜度為影像大小的平方,這會導致 GPU 運算需求過於龐大,另一原因 為實務上電腦視覺領域問題所需的辨識率高於語音訊號領域,為解決這兩問題, Vision Transformer 做了兩個改進: 1.引入卷積神經網絡中常用的層次化網路結構來建構層次化; 2.引 入區域資訊(Locality)概念,對於無重疊的視窗區域進行 Self-Attention 計算。

DRU 推估模型的網路架構顯示在圖 3.20,輸入資料除帶有劣化機率影像之外,還有橋梁構 件檢測的 E 值,在神經網路結構的設計上, Vision Transfomer 輸出後經過 GlobalMaxPooling 運 算,轉為一維張量(1D Tensor)資料,接著 E 值與一維張量資料串接,經過全連接層的回歸運後, 有輸出層輸出 DRU 數值,數值範圍為[1.5, 4.5], DRU 推估模型的未知參數數量約為 18 億個, 為一個中大型深度學習模型。



圖 3.20 本研究所使用的 DRU 推估神經網路模型

## 3.5 橋梁構件劣化判識流程與系統

本研究中橋梁劣化共分為6個類別,分別為裂縫、剝落、銹蝕、銹水、滲水及白華。原始 圖像先經過語意分割模型辨識出劣化區域後,再由另一神經網路模型回歸預測 D、R、U之值。 本節說明劣化類別和 DRU 之辨識與預測流程,以及模型間的整合,共分3部分做討論:橋梁 構件劣化辨識模型、DRU 推估模型,以及模型整合。橋梁構件劣化辨識模型為一自編碼器 (Autoencoder),模型輸入為彩色圖形,即大小 (3, H, W) 的張量。經過編碼後得到4張特徵圖 (Feature Maps), 再解碼成 (N, H, W) 的張量, 其中 N 是類別的數量, 代表每個像素屬於各類 別的機率。在6個劣化類別中,剝落、銹蝕、滲水、白華屬於大範圍的劣化,資料前處理時可 以做降採樣而不影響模型判識;而裂縫較為細小,不宜做降採樣,而銹水也偏向小範圍的分布。 因此在語意分割上分成兩個模型處理:模型 A(銹水、裂縫)、模型 B(剝落、銹蝕、滲水、白華)。 DRU 推估模型則將 6 個劣化類別分為三大類處理,分別為 DRU 模型 1(裂縫)、DRU 模型 2(剝 落、銹蝕)、DRU 模型 3(滲水、白華),如同前面所述,各模型輸入為原影像及語意分割預測結 果之線性組合以及 E 值。雖然原始訓練資料之 D、E、R、U 真值都是 2 至 4 的整數,但上述 三模型之輸出皆為介於 1.5 與 4.5 之間的浮點數。在模型結構方面,DRU 模型使用的骨幹為 Vision Transformer,經過全局平均池化(Global Average Pooling)和多層感知器(MLP)後,與E 值串接,再由另一 MLP 處理,輸出三組數值(如圖 3.20),分別代表 D、R、U 值的機率密度 函數,而曲線經過積分後,即得預測的D、R、U值。

由於 DRU 推估模型需要原影像與劣化辨識結果線性組合後的圖形作為輸入,前述之模型 A 及模型 B 的影像分割結果須先由一致的流程加以合併,其中單一模型內劣化類別以機率最

65

大者為預測結果,因此不會有類別間的衝突。將兩模型對同一影像之辨識結果合併時,可能有 單個像素被預測成不同類別之情形(例如模型 A 預測為裂縫,但模型 B 預測為剝落)。當此 情形發生時,處理方式為以模型 A 之預測為優先,若對於某像素兩模型皆預測非為背景,則以 模型 B 之結果作為預測的劣化類型。以圖 3.21 為例,原影像經模型 A 及 B 處理後,分別預測 出滲水、剝落、裂縫,其中部分剝落和裂縫區域有重疊,因此最後的合併結果以裂縫為優先。



原影像



圖3.21 劣化類別辨識結果結合

最後語意分割模型及 DRU 回歸模型的整合方式如圖 3.22 所示。原影像先經過兩語意分割 模型辨識劣化區域後,得到大小為 (H,W) 的分割結果,標示各像素所屬的類別,此影像分割 再由一預先設定的色表上色為大小 (3,H,W) 的張量,並與原影像做線性組合,融合後的影像 則和 E 值一同輸入至 3 個 DRU 模型做預測,最終得到 3 組預測結果,分別是類型 1 (裂縫)、 類型 2 (剝落、銹蝕)、類型 3 (滲水、白華) 的 D、R、U 預測值。



圖3.22 AI 模型整合與橋梁構件劣化判識流程

# 3.6 無人機相關技術開發

欲使用無人機進行自動橋梁巡檢時,無衛星訊號的橋梁下方導航飛行是目前較為困難的使 用情境,為解決這樣的困難,本研究將先制定無人機拍攝橋梁影像之標準,再提出拍攝橋梁單 一構件或部分區域之飛航路徑規劃,接著針對橋梁檢測任務,本研究特別設計一款 Y6 型無人 機,最後則是開發橋下無 GNSS 訊號之定位導航技術。

# 3.6.1 制定橋梁各構件拍攝作業標準

1. 制定無人機拍攝橋梁影像之標準

由於本研究 AI 深度學習所擬偵測之橋梁劣化類型有混凝土結構裂縫、混凝土剝落、破碎、 鋼筋外露、銹蝕、滲水、白華損傷等,其中混凝土結構裂縫的空間解析度要求比其他類型 高,需要到次釐米等級(例如 0.2 mm~0.3 mm),因此在拍攝標準不分構件類型,而是分 成高解析影像與低解析影像兩種,如表 3-6 所示。

	高解析影像	低解析影像
適用偵測劣化類 型	混凝土結構裂縫	混凝土剥落、破碎、鋼筋外露、 銹蝕、滲水、白華損傷
<b>畫素(μm)</b>	3~5 (以减少雜訊)	不限
空間解析度	0.2 mm ~0.3 mm	2 mm ~ 30 mm
亮度	灰階呈常態分佈,平均值接近128	,不可過度集中在暗區或亮區。
相片尺寸	全片幅 CMOS 感測器,例如 Sony A7R2 以上之數位相機。	其他尺寸感測器皆可
焦點定位(各方 向,涵蓋構件尺 寸)	相對橋梁表面,拍攝之入射角角度 不可大於45度,以免造成過大的幾 何變形,壓縮影像資訊,誤判裂縫 寬度。	相對橋梁表面,拍攝之入射角角 度不可大於 60 度,以免造成過 大的幾何變形,影響深度學習判 識劣化區的準確度。
相片張數	在满足空間解析度的要求下,原則 上橋梁表面每50cm x 50cm 的範圍 要拍攝一張照片,且相鄰照片的重 疊率要在60%~80%之間,以協助空 三平差之穩定求解。	在滿足空間解析度的要求下,連 續拍攝的相鄰照片間重疊率要在 60%~80%之間,以協助空三平差 之穩定求解。

表 3-6 無人機拍攝橋梁影像標準

由於仿間有各種消費型相機廠牌,為了降低成本、減輕重量又能符合拍攝之影像品質,建 議採用 Sony、Canon、Nikon 等全片幅微單眼相機,可搭配之鏡頭種類與焦距亦較有彈性。 因此就橋梁檢測 3D 建模與 AI 深度學習自動劣化偵測目的而言,並不需要指定特定相機 廠牌,僅需要求拍攝後影像之空間解析度與影像品質等。

(1) 垂直攝影

以裂縫劣化類型需求為例,建議採用 Sony A7r2、Sony A7r3、Sony A7r4 相機,並搭配 焦距(f)為 50 mm 以上之鏡頭。在此以 Sony A7r4 搭配 50mm 定焦鏡頭為例,由於其 CMOS 感測器大小(UxV)為 35.64 mmx 23.76 mm,影像大小為 9504 x 6336 畫素(Pixel), 每個畫素寬度(Pd)為 3.75 µm,因此在距離橋梁表面 2.7~4 公尺處垂直拍照時,所拍攝 之影像空間解析度或地面取樣間距(Ground Sampling Distance, GSD)約在 0.2~0.3 mm 間, 其空間解析度(GSD)與拍攝範圍(WxH)之示意圖如圖 3.23 所示,計算公式如下:

$$GSD = \frac{H'}{f} * Pd$$
$$W = \frac{H'}{f} * U, H = \frac{H'}{f} * V$$



圖 3.23 (左)空間解析度與照片涵蓋範圍計算示意圖、(右)垂直攝影

假如於距離橋梁表面 2.7 公尺(H')處拍照,則 GSD= $\frac{2700}{50}$ \*3.75  $\mu m \cong 0.2 \text{ mm}$ ,影像拍 攝範圍為 1.9 m x 1.3 m(如圖 3.24 所示),若影像重疊率為 60%則相鄰兩影像之間距在長 邊為 76 cm,在短邊為 52 cm(如圖 3.25 所示)。而假設距離橋梁表面 4.0 公尺(H')拍照, 則 GSD= $\frac{4000}{50}$ \*3.75  $\mu m \cong 0.3 \text{ mm}$ ,影像拍攝範圍為 2.9 m x 1.9 m(如圖 3.24 所示), 若影像重疊率為 60%則相鄰兩影像之間距在長邊為 116 cm,在短邊為 76 cm。簡而言 之,若以 Sony A7r4 相機搭載 50mm 定焦鏡頭拍攝裂縫,建議在離橋梁表面 2.7~4 公尺 處拍照,不管是上下或左右飛行移動時,每移動 50 公分即拍攝一張照片,如此即可滿 足空間解析度(0.2mm~0.3mm)與照片重疊率(>60%)的需求。



圖 3.24 拍攝距離 2.7 公尺與 4 公尺之拍攝範圍示意圖



圖 3.25 在距離 2.7 公尺時,前後左右相鄰照片 60%重疊率下之間距

(2) 傾斜攝影

由圖 3.23(右圖)可知在垂直拍攝一平面地物時,影像不會產生透視投影幾何變形, 但從

圖 3.26(左)傾斜攝影下計算地面解析度、(右)透視投影變形(右圖)可知在傾斜攝影下(地 物仍為平面)影像會產生透視投影變形,其空間解析度(GSD)之計算方式如下:

$$GSD = H'/\cos^2(\theta) * \beta$$

$$H'_{\theta} = H'/\cos(\theta)$$

其中β為 iFOV(一個像素的視野角), θ為某像素之傾斜角, a為相機光軸之傾斜角。因 此假設相機垂直平面之距離 H'不變,在不同光軸傾角a下,像幅中的近點(橫軸像素#0)與 遠點(橫軸像素#9500),因每個像素之θ不同故空間解析度也會不同。若改變a為 0、15、30、 45、60 度畫出每個像素之 GSD 可得到圖 3.27。由此圖可知當傾角a小於 15 度時,整個像 幅每個像素的空間解析度都可小於 0.3mm,而當a等於 45 度時,像幅中心點的空間解析 度已經達到 0.4mm,最遠點之空間解析度更超過 1mm。



圖 3.26 (左)傾斜攝影下計算地面解析度、(右)透視投影變形



圖 3.27 不同相機光軸傾角下,從近點到遠點之空間解析度。

(3) 建議拍攝方式

使用無人機方式搭載前述相機進行高解析影像之拍攝時,由於影像品質對於本案的成 果至關重大且橋梁下通常受到橋梁本身遮擋著陽光,因此建議於無人機相機雲台上加 裝 LED 燈光以便補光,為避免影像模糊,因此相機雲台應有避震功能。由於無人機拍 攝高解析影像之飛行速度小於每秒 50 公分,因此可採取固定快門 1/250 秒、光圈小於 F5 儘量擴大景深、ISO 儘量<400,以避免產生模糊與雜訊。

使用無人機進行拍攝高解析影像,為確保的相機拍攝穩定性,將相機架設於雲台上,使 鏡頭可以拍攝水平至垂直上拍的角度,在橋下進行拍攝時,拍攝原則採取連續且不停移 動方式進行,根據照片前後與左右之重疊率皆 60%-80%計算無人機移動速度,此外還 要考慮記憶卡寫入的速度為每秒幾張照片,建議儘量使用寫入速度大於 300 MB/s 的記 憶卡,以達到每秒1張的拍攝效率。如此一來,若無人機飛行速度小於每秒50cm,在 2.7~3公尺拍攝距離下,以定時每秒拍攝1張照片,即可滿足60%以上之重疊率。此外, 拍照時要避免定點轉動機身之拍攝方式(類似拍攝全景影像模式),會造成影像間之基線 太短與很小的交會角,將影響後續空中三角平差與定位精度。

若拍攝空間無障礙物,應該儘量採取垂直攝影,以減少透視投影變形,同時避免降低影 像之空間解析度。但是當拍攝對象位在狹小空間內或有障礙物時,例如兩個大梁間的側 面或樹木遮擋,且無人機體積又太大無法飛入此空間中時,僅能選擇傾斜攝影方式,其 相機光軸的傾斜角度也是儘量越小越好,最多不要超過45度。

2. 按照構件設計航線

以下針對常見的Ⅰ型梁與箱型梁構件,提出無人機航線的設計與拍攝方式。

(1) I型梁:大梁、横隔梁與橋面板底部

這些構件底部主要為水平面,因此拍攝這些部位時可以一起規劃航線,並且以垂直方式 往上拍,相機光軸垂直面對橋梁構件表面,唯橋面板之高度與大梁、橫隔梁之高度有顯 著差異,無人機的高度要跟著調整,以維持相似的空間解析度(圖 3.28)。此外航線設計 要延著道路方向飛行,不建議垂直於道路方向飛行與拍攝,原因是從橋梁外對上拍攝是 天空,進入橋梁後拍攝到橋面板與大梁,之後又離開橋梁拍攝到天空。如此作法將會造 成照片不連續,會影響後續影像空三平差的解算,而且影像容易造成天空太白、橋面板 太暗,以及產生眩光的情況。



圖 3.28 大梁、橋面板與橫隔梁下方採垂直往上拍攝

無人機在拍攝大梁、橋面板與橫隔梁下方之航線設計時,可以採用多條平行的航線,透 過"囗"字型路徑串接,如圖 3.29 所示。在拍攝大梁下方時,平行航線之間距為兩大梁 之距離;而拍攝橋面板與橫隔梁下方時,則按照橋面的寬度與相鄰影像之重疊率去計算, 如圖 3.25 所示約 50 公分。



圖 3.29 大梁、橋面板與橫隔梁下方之航線

(2) I型梁:兩大梁間大梁側邊

由於兩大梁間之空間可能太狹窄,無人機若太大將無法飛入拍攝,此時可以採用傾斜攝 影方式拍照(若無人機可飛入此空間,則改水平拍攝),但傾斜角度建議不要超過45度, 如圖 3.30 與圖 3.31 所示。此外為減少航線數量與減少拍攝作業時間,建議相機以直擺 方式拍攝,如圖 3.31 所示,會比圖 3.30 相機橫擺少1 條航線。在考量無人機與橋梁的 安全距離,前圖所示無人機與大梁之距離僅 80 公分,無人機操作員應該自行斟酌調整 此安全距離,以免造成無人機墜毀事件。唯距離加大後,傾斜拍攝之角度可能超過 45 度,則該影像之空間解析度會下降,如圖 3.27 紅色曲線(傾斜 60 度的案例),透視投影 影像變形也會比較嚴重,對裂縫的偵測將會受到影響。



圖 3.31 相機直擺傾斜攝影拍攝大梁側邊

如圖 3.32 所示拍攝大梁側邊之航線設計,原則上仍是沿著道路車行方向,規劃多條 平行航線,但為維持拍攝內容連續,在轉換航線時需要一邊移動或一邊轉彎並一邊拍攝, 而不要定點環景拍攝。



圖 3.32 無人機拍攝大梁側邊之航線設計方式示意圖

(3) I型梁:橫隔梁側邊

同一列的橫隔梁其幾何形式與位置一致,故應該設計在同一條航線上以便無人機按順 序拍攝,而為避免無人機碰到大梁,可以採用傾斜攝影方式拍攝照片,唯傾斜角度不要 超過45度。



此外為拍攝橫隔梁兩側,在航線設計上可以採用多條平行航線,並透過"П"字型航線 串接(如圖 3.34 所示),但此時要注意在"П"航線上相機的拍攝方向,不要轉向橋梁外 以免拍攝到天空造成拍攝內容不連續。此外拍攝大梁側邊時,可增加照片之重複觀測數, 另可視橫隔梁之高度,來決定相機要直擺或橫擺,而通常為減少航線數量,相機應該採 用直擺。



圖 3.34 無人機拍攝橫隔梁側邊之航線規劃方式

(4) I型梁:橋梁兩側大梁側邊與橋面板下方

拍攝橋梁兩側大梁側邊與橋面板下方時,可沿著整座橋梁兩側設計幾條航線一起拍攝, 同一條航線上盡量連續拍攝不中斷,以確保後續影像空三平差解算之成功率。鏡頭拍攝 方向,儘可能垂直於橋梁表面。但於兩結構垂直交接處,例如橋面板與大梁間,則需另 外以傾斜方式進行拍攝,以避免兩者間有間隙不完整,其餘盡量垂直於表面拍攝,如圖 3.35 所示。



圖 3.35 拍攝橋兩側大梁側邊與橋面板下方

(5) I型梁:帽梁與橋墩

在拍攝帽梁時可以使用水平方式拍攝,同時環繞拍攝整個帽梁4面,但為與上方的橫隔 梁銜接不造成漏拍,建議多1條航線傾斜約35度同時拍攝橫隔梁與帽梁;此外為不與 下方的橋墩銜接處有漏拍,亦建議多1條航線水平方向同時拍攝橋墩與帽梁,如圖3.36 所示。另外在環繞拍攝帽梁時遇到帽梁兩邊的斜面,應該降低高度並以傾斜攝影方式向 上拍攝帽梁兩邊斜面,如圖3.37紫色區域所示。

最後在拍攝橋墩時,假設橋墩僅有1個,且其形狀為圓柱、橢圓柱、方形柱或矩形柱, 皆可以環繞方式水平拍攝橋墩(如圖 3.38 所示)。若橋墩有2個以上,則可能因為兩橋墩 間的空間太小,無人機無法通過,則此處可以採用傾斜攝影方式進行拍照,而若無人機 可以通過,則各個橋墩需分開環繞 360 度面對橋墩拍攝,另為減少航線數量,建議相機 直擺。

77



圖 3.37 拍攝帽梁下方與橋墩之方式



圖 3.38 無人機拍攝圓柱型橋墩之航線規劃方式

(6) I型梁:橋台與翼牆/擋土牆

通常橋台與翼牆/擋土牆為垂直立面,類似房屋的牆面,因此可以水平方式拍攝橋台與 翼牆/擋土牆。而航線設計則為多條水平航線採用左右水平移動拍攝,飛到橋台兩端後 改變高度約50公分,繼續左右移動拍攝,如圖3.39所示,另為減少航線數量,建議相 機直擺。



圖 3.39 無人機拍攝橋台之航線規劃方式

# (7) 箱型梁:大梁側面

圖 3.40 為 1 座箱型梁的示意圖,其中橋台部分拍攝方式與航線規劃方式與前節 I 型梁的橋台相似,如圖 3.39 所示。而大梁部分,可再分成大梁側面與底部。另外還有接近路面的橋面板與護欄。



圖 3.40 箱型梁 3D 示意圖

在拍攝大梁側面時,因為其結構為垂直立面,類似橋台,所以相機直擺可減少航線,並 以等距離方式水平拍攝大梁側面,唯大梁底部為弧形,故在切換航線時可能是垂直上下 或斜線上下,如圖 3.41 所示。



圖 3.41 無人機拍攝箱型梁側面之航線設計方式

(8) 箱型梁:大梁底部

由於大梁底部為弧面,相機垂直往上拍,但為了維持相似拍攝距離,以便獲得相近之空 間解析度,航線應該儘量接近弧線,如圖 3.42 側面圖所示。而為了減少航線數,相機 像福較寬的那一邊,應垂直於飛行方向。從圖 3.42 上視圖可知,航線之間距亦約 50 公 分。



圖 3.42 無人機拍攝箱型梁下部弧面之航線設計方式

(9) 箱型梁:護欄、橋面板底部、兩面轉彎處

護欄多為垂直立面,故相機直擺後水平拍攝即可,航線為平行於道路車行方向,保持相 似距離,以獲得相似空間解析度的影像。

橋面板底部為水平面,視其寬度與距大梁側面的安全距離,決定是否垂直往上或傾斜攝 影往上拍攝,航線仍然是平行於道路車行方向,保持相似距離,以獲得相似空間解析度 的影像。

大梁垂直立面與大梁底部弧面之銜接(90度轉彎)處,建議多一條航線傾斜往上拍攝,若 在拍攝大梁側面(圖 3.43)改變上下傾斜航線時,旋轉無人機拍攝此銜接處,則可以不用 多拍此一航線。



圖 3.43 箱型梁護欄、橋面板底部與兩面轉彎處之航線與拍攝方式

#### 3.6.2 拍攝橋梁單一構件或部分區域之飛航路徑規劃

本研究提出一套無人機 3D 航線規劃系統,可將攝影測量所重建具有精確絕對地理坐標之 仿真橋梁 3D 網格模型匯入系統中,再透過此 3D 航線規劃軟體,輸入相關參數及選擇模式後, 系統自動生成無人機飛行路徑並可透過各種角度審視,確認路徑與橋梁之相對位置關係以確保 飛航安全。

針對單一橋梁構件或部分區域以無人機拍攝高解析影像,本研究同時應用將仿真 3D 網格 式橋梁模型與物件化橋梁 3D 模型(圖 3.44)匯入上述系統中。由於仿真 3D 網格式橋梁模型可 協助判斷橋梁周遭實際環境,而透過物件化橋梁 3D 模型橋,則可在針對特定構件或某些構件 設計航線時,利用橋梁表面矩形框的法線向量,來判斷無人機上數位相機的拍攝方向。若預估 之拍照位置上有其他構件會影響到飛航安全,就自動判斷及改變航線與拍照位置,同時要以最 小的傾斜角度進行拍攝,以減少影像之幾何變形。

82



圖 3.44 物件化橋梁 3D 模型範例

為將照片屬性對應至橋梁實際構件位置,本研究採用無人機自動路徑規劃表(表 3-7),以手 動規劃多個任務點及設定相關參數後自動生成巡檢路徑,經使用者審視確認航線安全無誤後, 無人機將執行自動任務進行飛行及拍照,拍照時以點位名稱欄位為標籤寫入照片 EXIF 中,或 是以點位名稱欄位為檔名儲存照片。拍照時可將自定義的資訊寫入照片 EXIF 中,以辨別照片 屬性對應至橋梁實際構件位置,以及飛機 GNSS 資訊,成果範例如圖 3.45 所示。

任務點	飛機模式	座標	高度	delay(s)	飛行速度	點位名稱
1	takeoff	(0,0)	5	0		
2	Guide	(-13,15)	10	0		
3	Guide	(-13,5)	10	0		
4	Camera			5		新威大橋-1號橋墩-點位1
5	Guide	(-8,5)	12	0		
6	Camera			5		新威大橋-1號橋墩-點位2
7	Guide	(-20,13)	10	0		
8	Camera			5		新威大橋-1號橋墩-點位3
9	Guide	(-40,23)	10	0		
10	Camera			5		新威大橋-2號橋墩-點位1
11	Guide	(-30,23)	10	0		
12	Camera			5		新威大橋-2號橋墩-點位2
13	Guide	(0,0)	15			
14	LAND					

表 3-7 自動路徑規劃參數表



圖 3.45 照片屬性等資料寫入 EXIF

除此之外,基於此航線規劃軟體視窗界面,本研究還可以進一步延伸此系統成為無人機飛 行時之 3D 監控軟體,如圖 3.46 示意圖所示,此監控軟體尤其是在操作無人機時無法直接觀看 飛機狀態特別重要。



圖 3.46 無人機橋面下多技術融合演算定位巡檢監控示意圖

# 3.6.3 橋梁檢測專用無人機設計

依據過去執行無人機橋梁檢測測試的經驗,目前市面上沒有現成完全符合需求之橋梁巡檢 無人機,因此本研究規劃設計一橋梁檢測專用無人機,考慮到酬載能力、能源效率以及各種拍 攝方向之巡檢需求等,將採用如圖 3.47 所示的 Y6(三軸六槳)多旋翼設計,Y6多旋翼的特殊 構形可以將巡檢用的相機(SONY A7R4)掛載於機身前緣,搭配自製相機雲台可控制相機拍 攝下方、前方及上方等方位的橋梁拍攝,並規劃於機身上方及前方搭載可程式控制之高亮度 LED 補光照明設備,用於拍攝橋下光源不足之情境使用,相機將依任務需求選擇搭載之鏡頭, 搭載 15 mm 鏡頭拍攝用來低解析影像,搭載 50 mm 鏡頭則用來拍攝高解析影像,尤其是針對 裂縫等細小劣化類型。本研究目前選用之相機及鏡頭資訊詳見下表。

	Mainten 15 mars	Maintless for some	C EE 50
Sony A7R/A	volgtlander 15mm	Volgtlander 50mm	Sony FE Summ
Solly A/R4A	F4.5 ASPH III VE	F1.2 ASPH VE	F2.5G SEL50F25G
		Liver in the second sec	
•6100 萬像素(9,504x6,336)	• 光圈 4.5-22	•光圈 1.2-22	• 光圈 2.5-22
•錄影 4K 30p (3,840x2,160)	•鏡頭結構9組11	•鏡頭結構6組8片	• 鏡頭結構 9 組 9
•35mm 全片福	片	•視角 47.5o	片
(35.7x23.8mm)	•視角 110o	•最小焦距 0.45 m	• 視角 47o
•Exmor R CMOS 感光元件	•最小焦距 0.3 m	•鏡頭直徑 70.1 mm,	• 最小焦距 0.35m
•快門 1/8000-30s,10 fps	•鏡頭直徑 66.4	長 58.8mm	• 鏡頭直徑 68
•ISO 100-32,000	mm,長 62.3mm	•濾鏡直徑 58 mm	mm,長 45mm
•W128.9*H95.4*D77.5 mm	•濾鏡直徑 58 mm	•重量 434 g	• 濾鏡直徑 49mm
●機身內建5軸影像穩定系	•重量 262 g	•手動對焦,Exif	• 重量 174 g
統	•手動對焦,Exif	•支援5軸圖像穩定	<ul> <li>自動對焦,Exif</li> </ul>
•防震動機械設計	•支援5軸圖像穩		• 支援機身穩定系
•4D Focus	定		統
•雙記憶卡插槽,支援			WG
UHS-II			
•JPEG 、 RAW			
•0-40 °C,665 g			

表 3-8 Sony 相機以及 15 及 50 mm 鏡頭



圖 3.47 本研究專為橋梁檢測設計開發之 Y6 橋梁巡檢無人機

此外考慮到無人機橋梁巡檢的飛行環境複雜度,本橋梁巡檢無人機將搭載水平 360 度以及 上下方單線式的防撞 LiDAR,確保無人機在飛行過程中,與橋梁及周邊障礙物保持安全距離, 避免發生擦撞、損傷。

依據以上的任務規劃,本研究設計一最大酬載能力為5kg,最大起飛重量小於15kg之Y6 多旋翼無人機,圖 3.48 為此無人機之飛行控制與監控示意圖,本系統將使用 MIT 國產開源 Pixhawk TD100-H7CPO 飛控系統作為無人機的自動駕駛系統(Autopilot),搭載高效能協作電腦 (Companion Computer)及相關設備進行橋面下方無 GNSS 訊號之定位導航運算,並透過4G/5G 通訊模組與地面站及雲端伺服器連線,即時將無人機狀態回傳,並可隨時透過網路進行任務路 徑修改或緊急處置等。



圖 3.48 無人機飛行控制與監控示意圖

## 3.6.4 開發橋下無 GNSS 訊號之定位導航技術

此技術是基於視覺優化的多技術融合演算定位技術,為融合局部感測器(相機、IMU)及全局感測器(RTK GNSS、UWB)的定位演算法(如圖 3.49 所示),在無人機能接受到 RTK GNSS 訊號時,緊耦合算法將提供全局無漂移的定位結果。當無人機飛往橋梁下方失去 RTK GNSS 訊號時,緊耦合算法會降為僅使用相機(視覺)及 IMU 的 VIO 定位結果,再與 UWB 定位資訊進行融合,仍可準確的估算無人機之位置與姿態提供全局無漂移的定位資訊。



圖 3.49 多技術融合演算定位技術算法流程圖

圖 3.50 為本技術應用場景示意圖,多技術融合演算定位技術的運作模式為於橋梁一跨的4 個端點架設4根長竿,其上方以 VBS-RTK 測量得絕對地理坐標,長竿下端裝置 UWB 定位固 定站,並將長竿頂端之絕對地理坐標扣除長竿長度後得到4個B固定站之絕對地理坐標。同時,無人機上亦搭載一個UWB移動站天線,可與4個UWB固定站即時傳輸計算無人機於橋下之位置,並將其位置與機載的局部感測器進行融合運算,以得到穩定、平滑且高精度定位,進而達成橋下定位導航飛行的目的。此外要環繞拍攝橋墩或於兩跨之間飛行拍攝,則需一次同時佈設8組UWB固定站,以免遮蔽效應阻擋UWB與無人機之通訊,而影響定位精度。



圖 3.50 無人機橋梁巡檢橋面下定位及導航示意圖

本研究開發此項多技術融合演算定位技術之主因是,局部感測器(如:相機、IMU 等)在小範圍內可以提供平滑、精確、頻率高的姿態,但誤差會隨著位移的增加而累積,而全局感測器(如:UWB、GNSS...等)在大規模環境可以提供全局無漂移的定位,但是噪聲大、頻率較低。透過局部及全局定位技術之相互修正的融合演算結合了兩類感測器的優點,可以提供平滑、精確、頻率高、全局無漂移的狀態估算結果,獲得精確度高於單獨使用各定位技術之定位結果, 並可解決無衛星訊號環境之定位問題。

傳感融合不僅是一種軟體上的演算法,也相當依賴硬體的質量,圖 3.51 為視覺慣性導航 (VIO)的硬體架構,其中 CMOS 分為全局快門(Global shutter)及捲簾快門(Rolling shutter)。本研 究使用全局快門,是為避免掉捲簾快門可能會產生的果凍效應。由於演算法假設慣性測量單元 (Inertial measurement unit, IMU)及相機的資料為時間同步下進行處理的,因此藉由微控制器單 元 (Microcontroller Unit, MCU)同時發送觸發信號給 IMU 及相機,相機觸發後透過影像傳輸介 面 (Camera Serial Interface, CSI)或高畫質多媒體介面 (High Definition Multimedia Interface, HDMI)傳送回計算單元之協作電腦(Companion Computer), IMU 則是透過序列傳輸介面 (Serial Peripheral Interface, SPI)到 MCU 上進行資料同步再透過通用非同步收發傳輸器(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART)介面傳送到計算單元。



圖 3.51 視覺與 IMU 融合演算定位架構

TD100-Fusion 450(圖 3.52)為本研究進行全局感測器(RTK GNSS)及局部感測器(相機&IMU)融合演算定位測試用之小型無人機,並用來驗證本研究所開發之定位演算技術,並在增加超寬頻(Ultra Wide Band, UWB)感測器後,修改融合演算法,用來驗證在無 GNSS 衛星定位 訊號之橋面下的定位與導航精確度。



圖 3.52 TD100-Fusion450 多技術融合演算定位技術無人機

UWB 定位方式相似於 GNSS 定位原理,透過量測與4個已知三維坐標之 UWB 基站(Anchor) 之距離後,計算出移動設備(UWB Tag)所在位置(如圖 3.53) (Shule et. al, 2008)。本研究兩年計 畫中將測試幾款 UWB 定位系統,有些 UWB 之規格提到其定位範圍最大可達 500 公尺,定位 精度規格為 10 公分,亦可內建 IMU 感測器,體積小可與無人機結合,進行室內或無 GNSS 衛 星訊號場域之定位與導航設備。本研究將評估這些 UWB 若同時使用視覺慣性導航 (VIO) 技 術進行融合演算後,是否可以提供更穩定且定位精度更高之定位資訊,並在實際案例測試後驗證其實用性,以便提供橋管機關未來採用無人機進行橋梁檢測時之配備規格。



圖 3.53 UWB 定位運作方式

多技術融合演算定位技術主要內容,包括坐標轉換(圖 3.54)、GVINS (Tightly Coupled GNSS-Visual-Inertial System)緊耦合演算法、UWB 鬆耦合融合演算法等 3 部分。本研究經過一連串的 測試及演算法調整修正,目前已將 UWB 原始資料併入 GRVINS (Tightly Coupled GNSS-Range-Visual-Inertial System)緊耦合演算法中,可提升定位精度及穩定度。
1. 坐標轉換

由於各定位方法提供的坐標系不同,為了將其進行轉換,我們分成4個不同的坐標系:

- (1) 感測器坐標系 (Body Frame):以感測器所在的位置為原點,以感測器接收的資料之坐標系為基準,本研究中的感測器坐標包含相機、IMU 及 UWB。
- (2) 局部世界坐標系(Local World Frame):以初始位置為原點,當下的頭向作為X軸正向,正左方為Y軸正向,而Z軸為地心的反向,本研究僅使用局部感測器所計算出的局部定位系統之坐標系。
- (3) 地心地固坐標系(Earth-centered, Earth-fixed (ECEF) Frame):以地心為原點,Z軸正向指向正北,XY平面位於赤道上,X軸正向指向本初子午線,Y軸正向會使得此坐標系為右手坐標系,本研究為GNSS的原始資料(Raw Data)解析出的坐標系。
- (4) ENU坐標系(ENU Frame):以初始位置為原點,X、Y、Z軸正向分別只向東(East)、 北(North)、上方(Up)。此坐標系是為轉換局部世界坐標與 ECEF 坐標系,與局部世界坐 標間的轉換只需要估算頭向的偏航角(Yaw,ψ)差值,而與 ECEF 坐標可透過經緯度來 轉換。



圖 3.54 坐標系統及轉換

2. GRVINS (Tightly Coupled GNSS- Range - Visual-Inertial System) 緊耦合演算法

要使用半自動無人機進行橋梁檢測,準確的狀態估算是當中最基本的問題。橋梁底下 GNSS 訊號不好甚至不存在,且視覺慣性導航(VIO)在長時間運行,會有嚴重的漂移現象,然而在 室外室內複雜環境下 UWB 測量,可能丟失或是受到嚴重干擾。因此我們所提出的系統目 的是在 GNSS、UWB 訊號大量丟失甚至完全不可用的複雜室內室外環境下,提供全局一致 的狀態估計。 要實現這樣一個全面的感測器融合系統,必須解決各個感測器間的數據同步、坐標系轉換、 精度不統一、訊號丟失及退化以及易於實際應用等工程問題。由於本研究採用緊耦合的 多感測器融合方法和系統設計,該系統充分利用4種感測器的優點,能夠無縫對應室內室 外 GNSS、UWB 丟失或是重新取得的情況,且實驗結果顯示,所提出的方法能夠有效的減 少長時間軌跡漂移的現象,並且提供平滑連續的狀態估計,此方法在橋梁巡檢中,看到極 大潛力的應用。

將系統狀態定義為給定所有觀測值時的最大化後驗狀態(Maximum A Posterior, MAP),假 設所有測量都互相獨立,每次測量的噪聲都是零平均高斯分布,MAP 問題可轉化為最小化 的問題:

$$X^* = \arg \max_{X} \prod_{t=0}^{n} \prod_{k \in S} p(z_t^k | X) = \arg \min_{X} \left\{ \left\| r_p - H_p X \right\|^2 + \sum_{i=1}^{n} \| r(z_i, X) \|_{P_i}^2 \right\}$$

其中 $X^*$  包含局部世界坐標下的位置(P)、速度(V)、姿態(Q)、特徵點的深度資訊、坐標轉換 之偏航角( $\psi$ ),而  $r_p$ 為先驗的因子殘差函數。以下為式子中所使用的各類因子的殘差函數:

(1) 慣性因子(Inertial Factor)

此因子測量結果包含 IMU 零偏、有噪聲的線性加速度和角速度。

$$\mathbf{r}_{B}\left(\tilde{z}_{b_{t_{k+1}}}^{b_{t_{k}}}, X\right) = \begin{bmatrix} \delta \alpha_{b_{k+1}}^{b_{k}} \\ \delta \beta_{b_{k+1}}^{b_{k}} \\ \delta \beta_{b_{k+1}}^{b_{k}} \\ \delta \theta_{b_{k+1}}^{b_{k}} \\ \delta b_{a} \\ \delta b_{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{w}^{b_{k}}\left(p_{b_{t_{k+1}}}^{w} - p_{b_{t_{k}}}^{w} + \frac{1}{2}g^{w}\Delta t_{w}^{2} - v_{b_{k}}^{w}\Delta t_{k}\right) - \hat{\alpha}_{b_{k+1}}^{b_{k}} \\ R_{w}^{b_{k}}\left(v_{b_{k+1}}^{w} + g^{w}\Delta t_{k} - v_{b_{k}}^{w}\right) - \hat{\beta}_{b_{k+1}}^{b_{k}} \\ 2\left[q_{b_{k}}^{w-1} \otimes q_{b_{k+1}}^{w} \otimes \left(\hat{\gamma}_{b_{k+1}}^{b_{k}}\right)^{-1}\right]_{xyz} \\ b_{a_{b_{k+1}}} - b_{a_{b_{k}}} \\ b_{w_{b_{k+1}}} - b_{w_{b_{k}}} \end{bmatrix}$$

(2) 視覺因子(Visual Factor)

此因子為測量從圖像中提取稀疏特徵後,對其進行 LK 光流追蹤後的投影殘差。

$$\mathbf{r}_{\mathrm{C}}(\tilde{\mathbf{z}}_{l}, X) = \widetilde{\mathbf{P}}_{\mathrm{l}}^{c_{j}} - \pi_{\mathrm{c}}(\hat{\mathbf{x}}_{l}^{c_{j}})$$

(3) 偽距因子(Code Pseudorange Factor)

此因子為轉換至局部坐標後接收衛星訊號時的原始測量接收機與衛星的距離,由於鐘時偏差及大氣干擾訊號導致的測量誤差。

$$\mathbf{r}_{\mathrm{P}}(\tilde{z}_{r_{k}}^{s_{j}},X) = \left\| R_{z}(\omega_{E}t_{f})p_{s}^{e^{-}} - p_{r_{k}}^{E} \right\| + c\left(\zeta_{s_{j}}^{\mathrm{T}}\delta t_{k} - \Delta t^{s_{j}}\right) + \mathbf{T}_{r_{k}}^{s_{j}} + \mathbf{I}_{r_{k}}^{s_{j}} - \widetilde{\mathbf{P}}_{r_{k}}^{s_{j}}$$

(4) 都卜勒因子(Doppler Factor)

此因子為計算接收衛星訊號時,由於接收器的移動速度導致訊號的偏差。

$$\mathbf{r}_{\mathrm{D}}\left(\tilde{z}_{r_{k}}^{s_{j}}X\right) = \frac{1}{\lambda}\mathbf{k}_{r_{k}}^{s_{j}}\left(v_{s_{j}}^{E} - v_{r_{k}}^{E}\right) + \frac{c}{\lambda}\left(\dot{\delta}t_{k} - \Delta\dot{t}^{s_{j}}\right) + \Delta\tilde{f}_{r_{k}}^{s_{j}}$$

(5) 鐘時因子(Receiver clock Factors)接收器鐘時偏差。

$$\mathbf{r}_{\tau}\left(\tilde{z}_{k-1}^{k}, X\right) = \delta \mathbf{t}_{k} - \delta \mathbf{t}_{k-1} - \mathbf{1}_{4 \times 1} \dot{\delta} t_{k-1} \tau_{k-1}^{k}$$

(6) 距離因子(Range Factors):基站與接收器的距離。

$$\mathbf{r}_{\mathrm{R}}\left(\tilde{z}_{b_{t_{k}}}^{anc}, X\right) = \left\|\mathbf{p}_{\mathrm{anc}}^{\mathrm{w}} - \mathbf{p}_{\mathrm{b}_{t_{k}}}^{\mathrm{w}}\right\| - \widetilde{\mathsf{R}}_{b_{t_{k}}}^{\mathrm{anc}}$$



圖 3.55 GRVINS 演算法流程圖

# 第四章 研究成果說明

利用無人機拍攝影像再搭配 AI 影像辨識,的確是可以協助傳統人工目視檢查工作,然無 人機與 AI 影像辨識如何搭配,須訂定一標準作業程序後,各項檢測工作方能以自動化方式進 行,本研究針對梁式橋、板橋、箱型橋等三種類型的混凝土橋梁,並利用無人機拍攝橋梁構件 影像,再透過 AI 深度學習,偵測影像上橋梁表面各種劣化類型,本章節將針對 AI 影像辨識與 無人機研究之具體成果分述如下:

# 4.1 橋梁管理資訊系統資料清洗成果

### 4.1.1 資料統計成果 (6 項主要構件)

本研究依據6種橋梁檢測構件(主梁、橫隔梁、橋墩/帽梁、橋面板、橋台、翼牆/擋土牆)之 劣化評等表,將橋梁管理資訊統之影像資料分別儲存在不同目錄中,並統計3種劣化類型D值 分別為2、3、4時各自之照片數量,統計結果如表4-1所示,總數量為676,676筆。表中顯示 D值越大,也就是劣化程度越嚴重之案例數量越少,此乃合理的現象,若D=4的數量與D=2 相似,則表示大量的橋梁必須及時維護,而維護完成後數量也會減少。由於此現象,後續在自 動評定DRU值時的深度學習訓練資料數量會造成不平衡問題,僅能以調整深度學習模型中的 權重參數來克服此問題。此外由表4-1亦可發現,第2種劣化類型(混凝土剝落、破碎、鋼筋外 露、銹蝕)的數量最多,第1種劣化類型(混凝土結構裂縫)次之,第3種劣化類型(滲水、白華) 數量最少。

### 4.1.2 資料統計成果(其餘構件)

本研究同時統計不在前節6種構件中的另外13種「公路一般性橋梁之檢測構件」各自之照 片數量,結果如表4-2,其中第13~17項屬於表3-1中的其他構件,故合計前面6種構件,總 數為19種,與表3-1之數量相同。從照片數量分析,橋護欄與伸縮縫之數量最多,都超過6萬 張,推測其原因主要是上部結構,人員容易到達檢測。

本研究接續統計 32 種新增之劣化類型(表 4-3),此表中不包括前述之其他構件,但增加一個橋墩/帽梁(屬於前節 6 種檢測構件)的墩柱傾斜、沉陷劣化類型(此劣化類型在前節未統計)。 從數量上統計,伸縮縫間雜物堆積此劣化類型之數量最多,此外此表最右兩欄為劣化之特徵形 式與 AI 之關係, AI 欄打 X 表示不適合以深度學習進行劣化類型之自動辨識,其原因是其劣化 特徵形式可能是「各種損傷形式表徵不一、定義不清、幾何變形」無法透過單一照片與單時期 照片進行判釋,另「聲音」特徵無法從影像辨識。其中僅具有影像特徵者,例如生銹腐蝕、植 生等,才有機會透過深度學習進行自動辨識。

95

本研究第1年將聚焦在前節所述之6種檢測構件與3種劣化類型之深度學習自動辨識,第 2年再增加前述具有影像特徵之劣化類型進行深度學習訓練與測試,同時於第2年計畫將提供 前述具有幾何變形相關劣化類型之自動判識可能解決方案。

構件名稱	劣化類型	D值	照片數量	構件名稱	劣化類型	D 值	照片數量		
		2	13725			2	2878		
	混凝土結構裂縫	3	9849		混凝土結構裂縫	3	593		
		4	457			4	1		
十辺	田牧上到苗、叶琼、细竹外	2	132165	此后初	泪怒上剑兹、肿疝、细结从	2	46722		
土米	花	3	15936	傾隔术	此 威 工 剥 洛 、 敬 碎 、 辆 肋 外 雷 、 錶 品	3	6818		
	路 355 年五	4	667		路小奶店	4	271		
	滲水、白華	2	23128		滲水、白華	2	1110		
		3	725			3	43		
			14967			2	2920		
	混凝土結構裂縫	3	8506	_	混凝土結構裂縫	3	1968		
		4	201			4	47		
橋台	泪怒上别兹、加磁、细统外	2	46964	带上海	泪怒上刹菇、破碎、细结外	2	8677		
	此 <b>秋</b> 工 羽 洛、 破 碎、 鋼 肋 外 霰、 錶 铀	3	6378	插上面	此 威 工 剥 洛 、 敬 碎 、 辆 肋 外 霰 、 錶 싊	3	Image: First State       2878         2       2878         5       593         4       1         2       46722         6       6818         271       1110         43       271         2       1968         47       8677         30       21         430       21         4126       1914         418       79527         21982       635         21731       1581         数       676676		
	44 47 AA	4	128		44 JUL 54	4	30		
	渗水、白華	2	14721		淡水、白菇	2	519		
		3	533		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3	21		
		2	36830			2	4126		
	混凝土結構裂縫	3	10830		混凝土結構裂縫	3	1914		
		4	207			4	18		
橋墩/	泪路上别范、吡応、细统外	2	106240	桥石石	泪怒上刹菇、破碎、细结外	2	79527		
帽梁	此 <b>妖</b> 工判浴、吸叶、 <sub>到</sub> 肋介 霞、錶鈾	3	9072	1100 100 100	此族工制谷、吸叶、驯肋外震、錶鈾	3	21982		
	24 <b>1</b> 76 594	4	275		FG 297 KA	4	635		
	<b>滚水、</b> 白菇	2	18370		<b>滚水、</b> 白菇	2	21731		
	<i>涔</i> 水、白垂	3	349		<b>冷小、日</b> 辛		1581		
						總數	676676		

表 4-16 種重要構件 3 種劣化類型不同 D 值之數量統計

# 表 4-2 13 種構件之照片數量

序號	<b>棈件編碼</b>	構件名稱(英)	構件名稱(中)	數量
1	3	approach_bank	引道路堤	34212
2	4	approach_guard	引道路堤護欄	18260
3	5	approach_protect	引道路堤保護措施	10185
4	6	waterway	河道	34134
5	8	abutment_fund	橋台基礎	3379
6	12	drainages	橋梁排水設施	21486
7	13	guardrail	橋護欄	81307
8	14	expansion	伸縮縫	62456
9	15	bearing	支承/支承墊/阻尼裝置	22213
10	19	pier_protect	橋墩/橋基保護設施	8440
11	20	pier_fund	橋墩基礎	13831
12	16	brake	防落設施	31031
13	22	column_bracing	側向支撐	88
14	40	joist	托梁	654
15	41	lateral_bracing	斜撐	367
16	43	top_slab	頂板	8563
17	44	bottom_slab	底板	555

	皮粉	提性代理	接件 2 搿(山)	提供夕瑠(苗)	やた難型	動器	特徵形式	AI
1	10	4	引道路堤護權	approach guard	支持措施	120	各種形式売微不一	X
2	9	15	支承/支承勢/阳尼裝置	bearing	《12/03》 螺栓損傷、欠缺、鬆動	193	各種形式表徵不一	x
3	8	14	伸縮縫	expansion	響栓、貓碇螺栓損傷、欠缺、鬆動	202	各種形式表徵不一	x
4	7	4	引道路堤護欄	approach guard	螺栓損傷、欠缺或鬆動或護欄脫落	234	各種形式表徵不一	x
6	9	16	防落設施	brake	螺栓損傷、欠缺、鬆動	234	各種形式表徵不一	x
7	19	14	伸縮縫	expansion	襯墊片或端部構件損傷	633	各種形式表徵不一	x
0	10	13	橋護欄	guardrail	支柱損壞	882	各種形式表徵不一	x
0	6	4	引道路堤護欄	approach_guard	護欄損傷	1250	各種形式表徵不一	x
10	7	13	橋護欄	guardrail	螺栓損傷、欠缺或鬆動或護欄脫落	1786	各種形式表徵不一	x
11	28	19	橋墩/橋基保護設施	pier_protect	防撞鋼版損傷	1943	各種形式表徵不一	x
12	23	15	支承/支承墊/阻尼裝置	bearing	支承裝置損傷	3270	各種形式表徵不一	x
13	17	12	橋梁排水設施	drainages	排水設施損傷	3414	各種形式表徵不一	x
14	6	13	橋護欄	guardrail	護欄損傷	4078	各種形式表徵不一	x
15	27	19	橋墩/橋基保護設施	pier_protect	保護設施損壞、移動或遺失	5280	各種形式表徵不一	x
16	24	15	支承/支承墊/阻尼裝置	bearing	支承座支承端部損傷	7188	各種形式表徵不一	х
17	31	16	防落設施	brake	防止落橋裝置損傷	8319	各種形式表徵不一	х
18	1	3	引道路堤	approach_bank	路堤損傷	14914	各種形式表徵不一	х
19	16	12	橋梁排水設施	drainages	排水設施阻塞或功能性降低	18741	各種形式表徵不一	x
20	22	14	伸縮縫	expansion	伸縮縫間雜物堆積	30999	各種形式表徵不一	х
21	26	15	支承/支承墊/阻尼裝置	bearing	阻尼裝置(包含如地震力分散裝置(LOCK-UPDEVICE)等)	3	定義不清	x
22	14	6	河道	waterway	所轄範圍河床之潛壩、固床工、河堤建造物等	160	定義不清	x
23	29	21	橋墩/帽梁	column	墩柱傾斜、沉陷	34	幾何變形	х
24	15	6	河道	waterway	上下游開採砂石	35	幾何變形	х
25	30	16	防落設施	brake	移動異常	42	幾何變形	х
26	3	3	引道路堤	approach_bank	沖刷或侵蝕	268	幾何變形	х
27	21	14	伸縮縫	expansion	伸縮縫間際異常	517	幾何變形	x
20	20	14	伸縮縫	expansion	高低差	810	幾何變形	x
20	30	15	支承/支承勢/阳尼裝置	bearing	移動異党	839	幾何變形	x
29	12	5	こうないのなどのなどのないのである。	approach protect	海動动行動設計進生	1073	総同機形	x x
30	12 r	,	「月間の死体受用心	approach_protect		2020	旅行時代	N N
31	5	8	備百基範	abutment_tund	奉ŵ 升刷、保路、掏空	2029	<u></u>	X
32	13	6	2000	waterway	闪追 <b></b> 仰派或愛邊	3306	茂何愛形	X
33	4	6	河道	waterway	提防沖刷或侵蝕	8581	幾何變形	X
34	5	20	橋墩基礎	pier_fund	基礎沖刷、裸露、掏空	11620	幾何變形	Х
35	18	14	伸縮縫	expansion	伸縮縫損傷(變形、生銹、腐蝕)	2178	幾何變形與影像特徵	V
36	11	4	引道路堤護欄	approach_guard	生銹或腐蝕	712	影像特徵	V
37	25	15	支承/支承墊/阻尼裝置	bearing	塵土雜物、 <mark>植生堆積</mark>	2063	影像特徵	V
38	11	16	防落設施	brake	生誘或腐蝕	3030	影像特徵	v
30	2	3	引道路堤	approach_bank	植物生長	4300	影像特徵	v
39	11	13	橋護欄	quardrail	牛猪或腐蝕	5619	影像特徵	V
40	11	15	古承/古承執/阴尼祥罢	hearing	生练或魔動	15992	影像粘劲	v
41	21	15	大小/大小王/他尼衣置	bearing		13002	形に除れていた	V
42	51	15	又承(又承型/阻尼装直	bearing	共佈實育	3	雪首	X
43	32	16	防落設施	brake	其常聲音	10	聲音	X
44	31	14	伸縮縫	expansion	異常聲音	372	聲音	Х

表 4-3 新增 32 種劣化類型

# 4.1.3 人工標注各式劣化區

表 4-4 為本研究利用 3 個月時間以人工標注 3 種劣化類型之統計成果,總數量為 4,262 張 照片。原則上本研究在挑選照片時是以不同的 D 值,不同的劣化類型,共 8 種組合,各個組合 的數量要接近一樣。但由此表可以發現 D=4 的照片數量相對較少,而第 3 類滲水白華則沒有 D=4,與劣化評等表一致,相對的第 3 類劣化類型的總數量也較另外兩類少一些。另外若按照 構件種類統計,則可以發現有些構件之數量少於 50 張,由於本研究不會根據構件各自訓練深 度學習模型,故不會造成影響。由於 D=4 照片數量偏少,對深度學習模型可能會造成資料數 量不平衡問題,因此本研究另外再申請使用高速公路局與公路總局的橋梁資料,但增加數量仍 有限,為解決不平衡問題,本研究以調整深度學習模型的權重參數來克服此問題。

● 全部	ß TBMS2 資料(按劣化類型與 D 值)	D2	D3	D4	小計			
Class1	混凝土結構裂縫	626	550	264	1440			
Class2	混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、銹蝕	548	619	314	1481			
Class3	渗水、白華	829	512	NA	1341			
	小計	2003	1681	578	4262			
	(按劣化類型_D 值與構件名稱)	主梁	橋台	橋墩/帽梁	横隔梁	擋土牆	橋面板	小計
	Class1_D2	80	80	80	140	160	86	626
	Class1_D3	80	80	80	85	140	85	550
	Class1_D4	79	86	82	0	9	8	264
	Class2_D2	80	80	80	80	80	148	548
	Class2_D3	80	80	140	135	120	64	619
	Class2_D4	73	37	60	43	5	96	314
	Class3_D2	100	160	160	129	100	180	829
	Class3_D3	165	113	80	5	5	144	512
	小計	737	716	762	617	619	811	4262
	(按劣化類型與構件名稱排序)	主梁	橋台	橋墩/帽梁	橫隔梁	擋土牆	橋面板	小計
Class1	混凝土結構裂縫	239	246	242	225	309	179	1440
Class2	混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、銹蝕	233	197	280	258	205	308	1481
Class3	<b>滲水、白華</b>	265	273	240	134	105	324	1341
	小計	737	716	762	617	619	811	4262

表 4-4 人工標注各式劣化類型之統計

# 4.1.4 資料清洗過程所遇問題

本研究取得資料庫時間範圍是在 2015 年至 2021 年之間,橫跨約6年。照片上傳自多家橋 梁檢測顧問公司中的多位橋梁檢測人員,由於其專業訓練程度不一,故上傳到資料庫的照片影 像品質不一。此外橋檢人員上傳到資料庫的照片主要目的是佐證性質,並不是為深度學習自動 辨識各種劣化類型而拍攝,因此拍攝時,對同一劣化區可能會有遠照與近照,導致影像解析度 不一致的問題,因此影像上所辨識出的裂縫,無法推算出實際寬度,也無法綜觀得知其相對於 整個構件的範圍,因此無法直接由一張照片判斷出E值。加上橋梁檢測規範於此資料期間有修 訂,過去採用定量的數值判斷劣化程度,後來則是以定性的方式描述劣化程度,因此橋檢人員 所評定的DRU 規則不一致,結果數字也會有所偏差。

為了避免影響深度學習模型的訓練,本研究在挑選照片進行劣化辨識時會將影像品質不佳 的照片濾除,例如下列圖 4.1~圖 4.9 各種案例:



圖 4.1 影像拍攝缺失(範圍太大、植被遮蔽裂縫、背光拍攝主體幾乎全黑等)



圖 4.2 資料錯置(目錄 D2 屬於翼牆/擋土牆,照片內容卻是橋墩)

D=3

D=2

D=4





D=4



圖 4.3 D 值之設定標準不一致



圖 4.4 大量重複照片



20170809143757\_575\_94268\_real\_...



20170811163048\_580\_88532\_real\_...



20170810112134\_463\_90003\_real\_...



20170814150654\_739\_176575\_real...

圖 4.5 照片內容與文字不一致



20170810122855\_575\_94114\_real\_...



20170815101352\_795\_91754\_real\_...

inspect photo 105	damage photo 20	damage photo 20	damage photo 20	damage photo 20.	damage photo 20				
2592-1944 190	1653-1169 193	1653-1169 100	1653-1169 100	1653×1169 190	1440×1080 196	675x1200 1PG	1440×1080 1PG	67.5x1200 190	1440x1080 JPG
inspect_photo_105	inspect_photo_105	inspect_photo_105	inspect_photo_105	inspect_photo_105	damage_photo_20	damage_photo_20	damage_photo_20	damage_photo_20	damage_photo_20
1653x1169 JPG	1653x1169 JPG	1653x1169 JPG	1653x1169 JPG	1653x1169 JP0	675×1200 JP0	1440x1080 JPG	675x1200 JPG	1440×1080 JPG	675x1200 JPG
inspect_photo_105	inspect_photo_105	inspect_photo_105	inspect_photo_105	inspect_photo_105	damage_photo_20	damage_photo_20	damage_photo_20	damage_photo_20	damage_photo_20
1653x1169 JPG	1440x1080 JPG	1440x1080 JPG	1440×1080 JPG	1440×1080 JPG	1440×1080 PPG				
inspect photo 105	damage_photo_20	damage_photo_20	damage_photo_20	damage_photo_20	damage_photo_20				

圖 4.6 照片內容錯誤(為河道高程剖面圖或熱紅外影像)



圖 4.7 照片雜訊(內含人、手、裂縫尺或其他標示物)



圖 4.8 照片內容錯誤(為 3D 電腦繪圖顯示劣化區相對於橋梁構件之位置)



圖 4.9 資料錯誤(同一張照片重複上傳到不同年期橋梁)

# 4.2 DRU 人工编輯初步成果

# 4.2.1 橋檢專家諮詢會議討論議題

本研究目的係藉由人工智慧影像辨識協助現行目視辨識影像工作,提升橋檢品質及效率。 研究照片來源為「車行橋梁管理資訊系統(原台灣地區橋梁管理資訊系統)」,因 DRU 評分具 有顯著差異性,故召開橋梁相關專家會議討論,改善 DRU 評分後獲得一致性結果,提升人工 智慧化影像辨識成果之可靠度與準確性。目前參考依據及資料包括「公路橋梁檢測及補強規範」、 「公路橋梁檢測及補強規範」、公路橋梁檢測人員「培訓教材」、「高速公路橋梁目視檢測手 冊」、「公路總局公路養護手冊」等。 目前本研究已初步規劃一個適用於 AI 識別的評等表,即將現行的 DRU 評等表分數將它拆 解出來,並且補充一些說明的文字,用以說明拆解後的分數原因。當 DRU 評等表透過拆解細 分後,將會得到一個有明確定義的劣化情形,並且同時符合現行規範的相關規定,因為 AI 訓 練的時候必須很清楚知道每一張照片所對應到的 DRU 評等分數,並且避免評等表出現一個 AI 識別上的模糊空間,在沒有清楚的界定劣化定義前,進行 AI 訓練的時候,將會面臨許多的困 難,因此必須將它拆解後,讓它有很精準的評等分數,這是研究當中所必須解決的問題。

在此專家會議中討論的議題包含了 R、U 評等採用連動法之可行性、照片拍攝遠近影響裂 縫之處理方式、E 範圍的計算,例如裂縫計算 E 時,為判定裂縫所占整個構件的長度、結構裂 縫與非結構裂縫,以及 AI 檢測對於未來橋梁檢測模式之作業方式。

## 4.2.2 會議具體成果

依照專家會議的建議,DRU的評定分數基本上為連動性並且DRU將不會有443的情況發生,因劣化情況如R已達嚴重,而U設定為3將不合理且不應有這種情形。DRU當初審定規範的時候亦討論過要連動,但考量到其彈性給一個範圍去調整,基本上DRU還是要依照分數連動性去評等。例如可能有一塊混凝土可能就是有剝落的這個情形,雖然不是很嚴重,但底下方有車輛通過,若掉落下來可能就會產生很嚴重的後果,所以保留一個彈性讓他去調配。最後關於DRU連動性,有時候可能會有一些衝突,如果將其評等為嚴重,可能會造成管養單位的壓力,因管養單位可能沒有足夠的時間與經費去做修繕這都會是一個問題。

對於拍攝距離的遠近將影響裂縫寬度大小的判定,由於此次從資料庫取得之劣化圖片,雖 然數量龐大,但是未有拍攝的距離資訊所以無法得知裂縫寬度,故在判定裂縫的大小上,係藉 由大量圖片的觀看進而透過定性的方式去定義細微、明顯及嚴重裂縫。在裂縫範圍的界定上, 前一版的規範是用 0.1、0.2mm 的定義,但對於無人機的判定上可能無法做到,且工程人員執 行上都有一定程度的困難。目前使用南非的規範,採用 0.3、0.6mm 的界定去定義細微、明顯 與嚴重裂縫,以工程人員能到達地方採直接量測,而無法到達的地方或是狹隘空間無法進入則 為定性的量測。

劣化範圍 E 值,依照原始評等分數未更改數值,因僅由局部的圖片資訊,計算其劣化範圍 可行性低。量測裂縫水平與垂直的裂縫長度,用量出來的長度與寬度相乘就可以得到面積,然 後再與全部面積相比即可以得到百分比 E 值。對於垂直裂縫,可以假設一個 5~10cm 水平寬 度再與垂直的高度相乘,最後與總面積相比。對於一些形況可能計算出來的 E 值不大,但是可 以透過 R 與 U 值來做調整,來辨別其嚴重狀態。

104

結構裂縫與非結構裂縫,研究中透過資料庫所得到圖片進行 AI 訓練,但由於單張圖片能 得到資訊有限,想要完整判定有其困難性,並且橋梁檢測的劣化種類,包含結構裂縫與非結構 裂縫,裡面有許多的專業工程師的經驗判斷,這些判斷有時候對於實務界都有其困難做判斷, 故目前 AI 訓練的對象為裂縫,並無特別針對結構裂縫。

未來橋梁檢測作業模式,也可能需因應 AI 的發展進行調整,無論是目視檢測或 AI 檢測, 都可能發展定位為初篩的層級及功用,後續是否需進一步詳細檢測、監測或修復補強,應由專 業工程師再做判斷決定,不再單純以資料庫系統中 U 值直接決定。規範的部分主要是給工程 人員使用的,與利用 AI 來判讀是不太一樣,使用 AI 來判讀可能還需要更精細,研究所規劃的 劣化評等表格,係從現行規範表格裡細分,整體的設計上將依專家委員提供的意見修改,做為 後續 AI 訓練與辨識上使用。

#### 4.2.3 DRU 修訂規則

根據前述專家會議結論與「公路橋梁檢測及補強規範」之劣化評等表格,將 DRU 評等分數細分為數個情況,詳如表 4-5 所示,以橋墩/帽梁為例,各種劣化情況的評分皆在表定的分數內,並且本研究係針對 3 種的劣化類型進行分類:Class1 為裂縫; Class2 為混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、銹蝕; Class3 為滲水、白華。

混凝土裂縫 DRU 的評等,根據裂縫的大小,判定細微、明顯與嚴重裂縫,若有滲水的發 生需要研判混凝土鋼筋是否發生銹蝕,鋼筋的銹蝕會造成鋼筋斷面設計的減少,影響原本的設 計強度,但是有時表面上的滲水並無法得知內容鋼筋是否發生銹蝕,因此採用較為保守的認定 將 DRU 值提高, 白華的發生亦跟滲水有類似的判定,由於水的影響使得混凝土表面析出氫氧 化鈣的結晶,同理也會將 DRU 值提高。對於剪力裂縫產生的影響,在 DRU 劣化評等表格並 無法反應,自動影像辨識主要針對裂縫,不會去辨別載重所產生的裂缝或是施工、溫度等之非 載重所產生的裂縫;混凝土剝落、鋼筋外露與銹蝕,在判別的規則上,主要根據剝落面積的大 小來評定 DRU 的分數,除此之外,還有一個重要的評定因數,鋼筋是否發生外露,鋼筋如果 外露與空氣直接接觸,將會加速鋼筋的銹蝕,此時 DRU 的評等分數將會提高,目前剝落面積 的大小,以定性的方式判別;滲水與白華,僅發生滲水時,DRU 的評定分數較低,如果可以明 顯地看到伴隨著白華發生,此時 DRU 將會是 222 的情況,如果除了滲水外,同時又看到銹水 時,可以合理的判定混凝土內部鋼筋受到水的侵蝕,並且已經有鋼筋銹蝕的現象發生,這些情 況將會一併的反應在 DRU 的評分上。以上為 DRU 之修訂規則說明,對於不同的構件,在劣 化評等上會有些許的不同。

105

劣化類型	劣化	情況	D	R	U
	細微裂縫,沒有滲水或鋼筋 銹蝕現象。	沒滲水、白華、銹水。	2	2	2
	明顯裂縫,但沒有滲水或鋼 筋銹蝕現象。	沒滲水、白華、銹水、鋼筋 外露。	3	2	2
	細微裂縫,但有滲水或鋼筋 銹蝕現象。	3	2	3	
混凝土結 構裂縫	明顯裂縫,但有滲水或鋼筋	有滲水,但沒銹水、鋼筋外 露。	4	3	3
TH AND	銹蝕現象。	有滲水,並有銹水或鋼筋外 露。	4	4	4
	嚴重裂縫。	沒滲水、白華、銹水、鋼筋 外露。	4	3	3
		有滲水或銹水或鋼筋外露。	4	4	4
	混凝土剝落或破碎,鋼筋未	鋼筋未外露	2	1	1
混凝土剝	外露或輕微外露。	鋼筋輕微外露	2	2	2
碎、鋼筋 外露、銹	混凝土剝落或破碎,鋼筋明 顯外露。	鋼筋明顯外露	3	3	3
蝕	大面積剝落、破碎或鋼筋嚴	鋼筋沒外露	4	3	3
	重腐蝕。	鋼筋有外露	4	4	4
滲水、白	滲水及白華。	有滲水白華	2	1-2	1-2
華	渗水及白華且銹水流出。	有滲水白華與銹水	3	2-3	2-3
	墩柱輕微傾斜或沉陷,尚不 影響行車安全。		2	2	2
墩柱傾 斜、沉陷	橋面與欄杆有分離、下陷, 恐影響行車安全。		3	2-3	2-3
	傾斜或沉陷異常,嚴重影響 行車安全。		4	4	4
其他損傷	不影響行車安全的損傷劣 化。		2	1-2	1-2
	影響行車安全或造成第三者 障礙。		4	3	3-4

表 4-5 橋墩/帽梁劣化評等(RC)

# 4.2.4 訓練用資料 DRU 人工編輯成果與統計

目前從資料庫中清洗出 4,262 張劣化圖片並且進行劣化標註,由於資料庫圖片之 DRU 評 定有不合適的部分,故根據規範與專家會議之建議編修其評分。經檢視完成標註的圖片,在圖 片裡有 3,304 張圖片經過編修,編修的比例為 77.48%。在表 4-6 中,分別將 3 種的劣化類型依 照構件區分,構件的種類有橋墩/帽梁、橋台、主梁、橫隔梁、橋面版、翼牆/擋土牆,每種構 件的劣化程度分為 D2~D4,在統計表格中,分別將各個劣化程度之圖片數量統計出來,該數 量表示為目前已檢視過的圖片數量。

項目	混凝土結核	構裂縫	混凝土剝落、破れ 露、銹1	碎、鋼筋外 蝕	滲水、	白華			
	D2	80	D2	80	D2	160			
橋墩/帽梁	D3	80	D3	140	D3	80			
	D4	82	D4	60	D4				
	D2	80	D2	80	D2	160			
橋台	D3	80	D3	80	D3	113			
	D4	86	D4	37	D4				
主梁	D2	80	D2	80	D2	179			
	D3	80	D3	80	D3	165			
	D4	79	D4	73	D4				
	D2	140	D2	80	D2	50			
横隔梁	D3	85	D3	135	D3	5			
	D4		D4	43	D4				
	D2	86	D2	148	D2	180			
橋面版	D3	85	D3	64	D3	144			
	D4	8	D4	96	D4				
89 July / 144 J	D2	160	D2	80	D2	100			
│ 異澗/福土	D3	140	D3	120	D3	5			
	D4	9	D4	5	D4				
總數	4,262								

表 4-6 已编修劣化圖片統計表

# 4.3 三種深度學習模型劣化區域自動判識成果精度分析

如 3.3 節所述,本研究因應不同之橋梁裂化類型,分別訓練一個 Deeplab V3+,一個 DeepLab V3++ 模型與一個 Lawin 模型,最後將所有辨識成果合併成一張劣化判識影像。為讓此項測試 有相同的基準,本項測試使用相同的訓練與驗證資料,原始影像與標註影像如圖 4.10 展示。



圖 4.10 左: 原始影像 右: 原始之標註影像

由於需要將資料更改為對應類別的輸入影像,因此將原始之標註資料進行轉換,將彩色標 註資料進行顏色取代,非劣化目標(黑色)的顏色一律轉為背景色(白色)。如此影像只存留前景 與背景兩類,換言之影像的值只有0和1,之後便可輸入進入模型訓練。完成標註的原始資料 集有4,262張影像,分別為各個劣化類別處理,在剔除調完全不含該劣化類別的影像並進行隨 機裁切後,裂縫、剝落、銹蝕、白華和滲水的資料數分別為24,080、21,860、18,400、12,150和 15,620張,每個劣化的資料集都以8:2區分成訓練與驗證之資料集。

在損失函數的部分,原本使用的是以下的 Cross Entropy:

 $CE(p_t) = -\alpha_t \log(p_t)$ 

為了使模型更集中於前景及易分類錯誤的目標, Lin et al. (2017)提出 Focal Loss:

$$FL(p_t) = -\alpha_t (1 - p_t)^{\gamma} \log(p_t)$$

Focal Loss 除可調整權重使模型更注重於目標類別之外,還可以調整參數 γ 使模型也專注 於易分類錯誤的目標。此外由於目前的辨識任務皆可視作一個二分類的任務,因此損失函數可 採用 Binary Cross Entropy,這是針對二分類任務設計的損失函數,期望可達到更穩定的預測成 果。本研究使用了動量為 0.9 的 SGD 優化器,權重衰減率為5e<sup>-4</sup>、初始學習率設為10<sup>-3</sup>,在 訓練超過 50 個 epoch 後,每 10 個 epoch 會再下降 1/10,對每個劣化的模型皆訓練了 90 個 Epoch。

圖 4.11 為 3 種劣化辨識神經網路模型測試相同資料之比較,由於 DeepLab V3++是基於 DeepLab V3+進行改良的模型,此處和 DeepLab V3+之預測結果比較,以驗證本研究改良的方 法是否比原模型更為精準,若需比較更多 Deeplab V3+與 V3++之辨識成果,詳見附錄 6。



圖 4.11 DeepLab v3+、DeepLab v3++與 Lawin 影像劣化辨識結果比較

根據章節 3.3 提到的平均交併比(MIoU)、加權交併比(WIoU)、目標類別交併比(TIoU)、總 體準確度(OA)、平均使用者精度(Mean User's Accuracy, MUA)、平均生產者精度(Mean Producer's Accuracy, MPA)、召回率(Recall, R)、精確率(Precision, P)、Kappa 值(K)、F1(F)、漏授誤差 (Omission Error, OE)和誤授誤差(Commission Error, CE)指標,本研究量化成果以比較與呈現 AI 模型的辨識能力,評估結果顯示在表 4-7。

劣化類別		裂缝			剝落			鏞蝕			白華			滲水	
北海 (0/)	DeepLab	DeepLab	Lawin	DeepLab	DeepLab	Lawin	DeepLab	DeepLab	Lawin	DeepLab	DeepLab	Lawin	DeepLab	DeepLab	Lawin
相休 (%)	V3++	V3+		V3++	V3+		V3++	V3+		V3++	V3+		V3++	V3+	
MIoU	70.43	61.16	74	85.98	69.21	79.9	81.71	64.89	77.6	82.54	69.65	77.5	84.01	72.05	71.8
WIoU	46.53	29.86	48.2	76.76	50.23	62.4	67.23	37.44	55.7	70.55	49.65	56.2	75.51	57.88	50
TIoU	41.22	22.9	48.1	74.71	46.02	61.2	64.01	31.34	55.5	67.89	45.21	55.7	73.62	54.73	47.3
OA	99.63	99.43	99.8	97.45	92.86	98.6	99.42	98.45	99.8	79.34	94.37	99.3	95.16	90.59	96.5
MUA	76.88	66.56	82.2	90.76	76.79	91.2	87.11	70.56	87.4	88.45	76.64	86.4	89.95	81.53	85.3
MPA	81.71	70.94	82.7	93.48	83.22	84.6	90.84	77.39	84	91.1	83.59	84.8	92.07	83.74	78
R	63.64	42.23	65.4	88.7	71.61	69.7	82.04	55.78	68.1	83.89	71.19	69.8	87.61	73.83	57.2
Р	53.91	33.35	64.5	82.57	56.29	83.4	74.44	41.7	75	78.07	55.33	73.3	82.18	67.9	73
Kappa	58.19	36.99	<u>64.9</u>	84.13	59.14	75.3	77.76	46.95	71.3	79.45	59.27	71.2	81.93	65.15	62.4
F1	58.38	37.27	64.9	85.53	63.03	76	78.06	47.72	71.4	80.87	62.26	71.5	84.81	70.74	64.2
OE	36.36	57.77	34.6	11.3	28.39	30.3	17.96	44.42	31.9	16.11	28.81	30.2	12.39	26.17	42.8
CE	46.09	66.65	35.5	17.43	43.71	16.6	25.56	58.3	25	21.93	44.67	26.7	17.82	32.1	27

表 4-7 辨識成果之指標比較

從表 4-7 可看到各項指標中,本研究使用的 DeepLab v3++較佳,在 MIoU 方面, DeepLab V3++比 DeepLab V3+提升了 9-16%,在漏授誤差(OE)的部分,則降低了 14-32%。證明研究的 方法可有效的提升模型辨識能力,且有高比例的劣化都被偵測出來。雖然至目前為止已可達到 可觀的辨識成果,但此方法仍有改善的空間,如為求辨識的穩定性而分別對各劣化種類進行模型的訓練;然而影像中同時出現多劣化類別的機率頗高,以使用者的角度,自然是讓模型可一 次偵測出所有劣化類別會更方便。

此外 DeepLab V3++與 Lawin 之初步比較結果顯示, DeepLab V3++於剝落、銹蝕、白華、 滲水等類別表現優於 Lawin (TIoU 約為 50%至 60%), 而裂縫類別則由 Lawin 表現較佳 (TIoU 約為 48%),原因可能為 Lawin 所使用之 Transformer 結構使模型可視範圍增廣,加強大範圍 裂縫的辨識。

# 4.4 深度學習自動評定 DRU 值結果

DRU 深度學習模型訓練所使用的影像資料數量為4,262 張影像,將6個主要劣化類別分3 類處理,每個劣化類型訓練1個DRU 推估模型,分別為模型1(劣化類別:裂縫)、模型2(劣化 類別:剝落、銹蝕)與模型3(劣化類別:銹水、滲水、白華),各模型輸入為原影像及所偵測的劣化 區域之線性組合以及E值,輸出為D值、R值與U值,其數值為浮點數、範圍為[1.5,4.5]。模 型訓練超參數設定: Batch Size 設定為 2、最佳化方法選用隨機梯度下降法(Stochastic Gradient Descent)、最佳化方法學習率為 0.0001、動量(Momentum)值為 0.9、訓練疊代次數(Epoch)為 100, 損失函數選用 平均絕對誤差 (Mean Absolute Error, MAE), 平均絕對誤差的定義為  $MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{|\hat{D}_i - D_i| + |\hat{R}_i - R_i| + |\hat{U}_i - U_i|}{3}$ ,其中 $\hat{D}_i \cdot \hat{R}_i \cdot \hat{U}_i$ 為模型推估值; $D_i \cdot R_i \cdot U_i$ 為 DRU 真值; n為訓練資料數量。圖 4.12 為 DRU 推估模型訓練與驗證損失函數收斂曲線圖,收斂後模型 1 訓練與驗證損失函數數值為 MAE=0.155/0.254;模型 2 訓練與驗證損失函數數值為 MAE=0.295/0.360;模型 3 訓練與驗證損失函數數值為 MAE=0.247/MAE=0.194,訓練與驗證損 失函數數值差值顯著,有過度擬合現象,應繼續增加訓練資料數量與內容的多樣性。



圖 4.12 推估模型訓練損失函數收斂曲線圖(藍色為訓練資料,橘色線為驗證資料)

表 4-8、表 4-9、表 4-10 分別顯示 DRU 推估模型 1-3 驗證資料結果, 左欄為帶有劣化機率 的影像,此影像的劣化區域被突顯,而其他區域被淡化,用意在使模型的學習與 DRU 數值的 推估著重於劣化區域。DRU 的推估值、真值及誤差顯示在右 3 欄,由於 DRU=4 的影像資料偏 少,代表訓練資料有類別數量不平衡的問題,這問題雖已使用加權損失函數抑制,但資料數量 與多樣性仍需增加。

表 4-8 DRU 推估模型 1 驗證結果

劣化機	模型推估值				真值			誤差	
率的影 像	D	R	U	D	R	U	D	R	U
>	2.52	1.97	2.13	3	2	2	0.48	0.03	-0.13
	2.91	2.03	2.23	4	3	3	1.09	0.97	0.77
)	2.19	1.98	2.08	2	2	2	-0.19	0.02	-0.08

劣化機	模	型推估	值		真值			誤差	U			
率的影 像	D	R	U	D	R	U	D	R	U			
	2.15	1.98	2.0	2	2	2	-0.15	0.02	0			
	3.87	3.79	3.79	4	4	4	0.13	0.21	0.21			
	2.07	1.24	1.25	2	1	1	-0.07	-0.24	-0.25			

表 4-9 DRU 推估模型 2 驗證結果

表 4-10 DRU 推估模型 3 驗證結果

劣化機	模	型推估	值		真值			誤差	
率的影 像	D	R	U	D	R	U	D	R	U
1	2.20	2.05	2.07	2	2	2	-0.20	-0.05	-0.07
1	2.90	2.73	2.76	3	2	2	0.10	-0.73	-0.76
1	2.18	2.08	2.09	2	2	2	-0.18	-0.08	-0.09

研究中 3 個 DRU 推估模型的驗證統計數據顯示在表 4-11,在 3 個模型相比較下,模型 3(MAE=0.192, σ<sub>AE</sub>=0.2, DRU 準確度=~90%)的表現最佳,原因為測試與驗證影像資料集的 R 值 等於 U 值,表示資料的多樣性低、資料的一致性高;模型 2(MAE=0.360, σ<sub>AE</sub>=0.410, DRU 準確 度=~70%)的表現有待加強,原因為前面所提的模型過度擬合,訓練資料數量與多樣性不足有 關。關於各類別之預測結果統計如圖 4.13,各條狀圖中橫軸皆為預測值和真值之差,縱軸為影 像數目,由圖可知約 70%至 90%之預測值皆落於真值±0.5 之範圍內。



圖 4.13 D、R、U 各類別預測成果

英圭	少化粘则	MAE	-		準確度	
候尘	分化類別	MAL	<b>O</b> <sub>AE</sub>	D	R	U
DRU 模型 1	裂縫	0.254	0.286	73%	89%	78%
DRU 模型 2	混凝土剝落、鋼筋外露、銹蝕	0.360	0.410	77%	70%	70%
DRU 模型 3	滲水、白華	0.192	0.200	95%	90%	90%

表 4-11 DRU 推估模型驗證資料統計數據

## 4.5 AI 影像辨識成果測試

# 4.5.1 橋梁選定與影像資料清洗

本研究依「公路橋梁檢測及補強規範」之劣化評等表格,將 DRU 評等分數細分為數個情況,各種劣化情況的評分皆在表定的分數內,並且針對 3 種的劣化類型進行分類, class1:裂縫; class2:混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、銹蝕; class3:滲水、白華。本研究團隊採用現行之 DRU 評等規範表格,並且將其劣化情形細分,同時依照專家會議的建議,進行後續之 DRU 評等,以期能夠符合現行規範規定,並同時兼顧 AI 的訓練需求。

對於 14 座橋梁之驗證資料,包含公路總局9座與高公局5座的橋梁檢測資料,與模型訓練用資料一樣先進行清洗與整理,清洗標準與訓練與4.1.4節標準一致,主要係為其劣化特徵

不明顯、拍攝距離過遠等,如圖 4.18 所示。清洗過程中發現有其他的劣化類型蜂窩,如圖 4.14、 圖 4.15、圖 4.16 如所示,而本研究主要針對裂縫、混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、滲水與白華 等相關劣化種類,故蜂窩劣列為其他劣化類型,尚有些劣化圖片可能在施工期間,混凝土尚未 硬固前碰觸所造成之凹陷,或是水泥砂漿溢出所形成之不規則表面,如圖 4.17 所示。清洗後 數量統計如附錄 7。

在 DRU 評分方面,14 座橋梁為目前人車行走的橋梁,故劣化程度 D 值大都集中在2,裂 縫大都為細微裂縫,少數為明顯裂縫,混凝土的剝落大都為小面積的剝落與破碎,鋼筋外露的 部分亦為輕微外露占大多數,僅有少數橋面板有發生較大面積剝落,滲水、白華主要是發生在 橋面板的劣化構件圖片,綜合以上所述,驗證資料之 D 值,將會集中會 2~3 之結果,所占的 比例較高,DRU 修訂成果如附錄 8。



圖 4.14 驗證圖片(1)



圖 4.15 驗證圖片(2)



圖 4.16 驗證圖片(3)



圖 4.17 驗證圖片(4)



圖 4.18 驗證圖片(5)

### 4.5.2 AI 影像辨識測試方法與結果

14 座橋梁清洗後影像會經過 DRU 數值編修,但考量影像編修人力的能量,不會標記影像劣化區域,測試影像劣化區域會視覺顯示 AI 模型所辨識區域,至於辨識準確度等評量,可 參考章節 4.3 驗證資料 AI 模型辨識表現評估(表 4-7),而 14 座橋影像 DRU 數值推估模型的評 估方法採用平均絕對誤差MAE與誤差標準差σ<sub>AE</sub>。

14 座橋梁影像劣化區域辨識與 DRU 推估模型測試結果顯示在表 4-12,從劣化區域辨識視 覺結果可看到 AI 模型可穩且正確的判識劣化位置,忽略影像各式非劣化雜物與背景,AI 模型 橋梁影像劣化辨識能力應可與橋檢專業人員匹配。部分 DRU 模型的推估值、真值與其誤差也 顯示在表 4-12,其於例子放置於附錄 9,另外 DRU3 模型整體測試數據顯示在表 4-13,成果與 模型驗證結果相似,相較於 DRU 模型 1(MAE=0.313; $\sigma_{AE}$ =0.300)與 DRU 模型 2(MAE=0.431;  $\sigma_{AE}$ =0.533),DRU 模型 3 (MAE=0.331; $\sigma_{AE}$ =0.165)有較好表現。整體而言,DRU 推估深度學 習模型方面可行,但需解決影像空間尺度不一與模型過度擬合問題,影像空間尺度不一可使用 攝影測量與具有高定位精度 UAV 解決,模型過度擬合則需要大幅增加訓練資料集數量與多樣 性。

百些佬	劣化區域辨識結	模型推估值				真伯	直	誤差			
小羽豚	果	D	R	U	D	R	U	D	R	U	
Sa C	-	3.01	2.75	2.75	2	2	2	-1.01	-0.75	-0.75	
	a Anda	2.35	2.11	2.11	2	2	2	-0.35	-0.11	-0.11	
		2.19	2.08	2.09	2	2	2	0.19	0.08	0.09	

表 4-12 14 座橋梁影像劣化區域辨識與 DRU 推估模型測試結果

	2.19	2.08	2.09	2	2	2	-0.19	-0.08	-0.09
	2.88	2.61	2.61	3	3	3	0.12	0.39	0.39
	2.58	2.28	2.27	2	2	2	-0.58	-0.28	-0.27
A REAL PROPERTY OF	2.85	2.03	2.21	2	2	2	-0.85	-0.03	-0.21

表 4-13 DRU 推估模型 14 座橋梁測試統計數據

किंद जन्म	() 11. 米五 五1	МАБ		準確度				
模型	为10朔別	MAE	$\sigma_{AE}$	D	R	U		
DRU 模型 1	裂縫	0.313	0.300	60.8%	91.3%	66.9%		
DRU 模型 2	混凝土剝落、鋼筋外露、銹蝕	0.431	0.533	82.4%	57.3%	57.1%		
DRU 模型 3	滲水、白華	0.331	0.165	94.5%	90.2%	90.2%		

影像劣化區域辨識模型與 DRU 推估模型存在程度不一的過度擬合問題,尤其裂縫、銹水 劣化類別與 3 個 DRU 推估模型,建議提高訓練資料的多樣性與數量,以增強模型推演能力。 由於 100%模型辨識準確度(Accuracy)與交併比(IoU)不真實,建議在容許誤差下以模型實務應 用的可行性與降低專業人力為目標。

### 4.6 無人機照相補光設計與測試成果

由於本研究 AI 深度學習所擬偵測之橋梁劣化類型有混凝土結構裂縫、混凝土剝落、破碎、 鋼筋外露、銹蝕、滲水、白華損傷等,在以無人機進行橋梁檢測空拍作業,為能確保所取得之 影像品質足以進行後續之 AI 建模及辨識,需要對於影像的品質訂定拍攝標準。依據「公路橋 梁檢測及補強規範」定義之各類型構件,分別針對畫素、亮度、相片尺寸、焦點位置(各方向, 涵蓋構件尺寸)及相片張數等訂定個別拍攝標準(如表 3-6)。在畫素大小約為 3-5μm,空間解析 度為 0.2~0.3 mm,亮度以灰階呈常態分佈、平均值接近 128 且不可過度集中在暗區或亮區, 保證相片色調亮度均勻,不可出現曝光過度或曝光不足等情況;此外相片尺寸為全片幅 CMOS 感測器,焦點定位要在相對橋梁表面,拍攝之入射角角度不可大於 45 度,以免造成過大的幾 何變形或壓縮影像資訊而造成誤判裂縫寬度;在滿足空間解析度的要求下,原則上相片張數以 橋梁表面每 50cm x 50cm 的範圍要拍攝 1 張照片,且相鄰照片的重疊率要在 60%~80%之間, 以協助空三平差之穩定求解。

無人機飛行過程中的震動會造成影像模糊而使得無法以 AI 判識劣化等級,所以需要縮短 快門時間以得到清晰畫質的影像。光線不足時會造成目標物辨識不清,所以需要延長曝光時間, 此外影像亮度不均亦會影響 3D 建模,所以需要盡量維持拍照範圍內之光源均勻分佈。為此無 人機照相補光設計目標為拍照範圍光源均勻分佈、連續光、光線漸層灰階成常態分佈、拍照影 像嗓訊低、不影響視覺定位,而拍照測試環境會選擇在全暗環境或微光環境進行,為使高解析 影像之 GSD 為 0.3 mm,會以距離拍攝目標約 3.5 公尺的情況下,在靜止情況下開啟光源拍照 測試效果。測試參數設定為光圈介於 F4.0 ~ 8.0、拍照快門不超過 1/500 秒、ISO 盡量不超過 400,並以 10~12 顆 1200 流明 XM-L2 強光手電筒之燈珠做為提供補光之光源。

表 4-14 為本研究所設計之兩種光源,在以第 1 型設計的光源(10 顆燈珠,直射)進行測試時,發現會造成亮度集中在影像中心而四周偏暗的情況,因為每個燈珠投射出去的光會以中心的亮度最高;為解決此問題,第2型設計的光源(12 顆)不再是全部直射,而是帶有 0 至 5 度的偏角往前照射,將每一個燈珠的亮點稍微分散向兩側,希望能使拍照範圍內之光源能均勻分布。

119



表 4-14 預計搭載於橋梁巡檢無人機之補光設計

實際於亞洲無人機 AI 創新應用研發中心辨公室模擬微光的環境下,以 Sony A7R4 相機搭 配 Voigtlander 50mm F1.2 ASPH VE 鏡頭進行的測試結果如

表 4-15,雖然無法在拍照快門不超過 1/500 秒及 ISO 不超過 400 的下取得適合的影像,以 現階段情況來看,在無人機飛行速度 50 cm/s 的情況下,光圈 F4.0、快門 1/200 秒、ISO 500 將 會是搭配 Voigtlander 50mm F1.2 ASPH VE 鏡頭的最佳選擇。

項次	光圈	快門	ISO	測試環境	照片	直方圖預覽
1	F4.0	1/200	500	微光		0 64 128 192 285
2	F4.0	1/200	800	微光		0 64 128 192 295

表 4-15 補光設計之參數測試結果

項次	光圈	快門	ISO	測試環境	照片	直方圖預覽					
3	F4.0	1/250	640	微光		0 64 128 192 265					
4	F4.0	1/250	800	微光		0 64 128 192 205					
5	F5.6	1/250	500	微光		0 64 128 192 255					

# 4.7 無人機拍攝橋梁各構件之航線規劃初步成果

為將照片屬性對應至橋梁實際構件位置,本研究設計之無人機自動路徑規劃流程(圖 4.19) 中,首先以Blender 手動規劃多個任務點及設定相關參數後自動生成巡檢路徑(圖 4.20,圖 4.21), 經使用者審視確認航線安全無誤後,無人機將執行自動任務進行飛行及拍照。Blender 物件資 訊(表 4-16)本身有7個欄位(idx 0、idx 1、idx 2、idx 3、idx 4、idx 5、idx 6),分別存入拍照編 號(Seq)、X 軸數值、Y 軸數值、Z 軸數值(相對高度)、構件編號、航向角、雲台角度等資訊。 拍照時會根據是否有拍照(圖 4.22)而將上述自定義相關物件資訊寫入照片 Exif 中,未來在以 AI 模型辨識這些照片時,就可以將這些物件資訊代入標籤中,可以辨別照片屬性對應至橋梁 實際構件名稱、位置及無人機 GNSS 等資訊。



圖 4.19 3D 模型構件編號納入航線規劃



• Blender航線規劃路徑:水滴尖端為機頭方向



圖 4.21 以 Blender 規劃之無人機航線

idx0	idx1	idx2	idx3	idx4	idx4	idx4	idx5	idx6	實際	除構件
Sag	X 佶(cm)	v 估(cm)	扣料言府(cm)	構件編碼	構件編碼	構建編碼	航向	雲台	構件	堪化
seq	A 値(UIII)	y 值(CIII)	相到同及(CIII)	1	2	3	角	角度	編號	伸行
	70.30971646	1054.668522	625.3626347	2A661F	4966544554	1B6-6	-33	90	1B6-6	橋面板
	114.72013	1049.752045	624.5306015	2A661F	4966544554	1B6-6	-33	90	1B6-6	橋面板
	159.1305375	1044.835567	623.698616	2A661F	4966544554	1B6-6	-33	90	1B6-6	橋面板
	203.5409689	1039.919186	622.8665829	2A661F	4966544554	1B6-6	-33	90	1B6-6	橋面板
	247.9513645	1035.002708	622.0345497	0	0	0	-33	90	NA (無	人機轉向)
	247.9513645	1035.002708	622.0345497	0	0	0	2	90	NA (無	人機轉向)
	247.9513645	1035.002708	622.0345497	0	0	0	38	90	NA (無	人機轉向)
	247.9513645	1035.002708	622.0345497	0	0	0	74	90	NA (無	人機轉向)
	247.9513645	1035.002708	622.0345497	0	0	0	110	90	NA (無	人機轉向)
	247.9513645	1035.002708	622.0345497	1C6500	8348547153	S06G5	146	90	S06G5	主梁
	220.6524372	993.4335709	622.157526	1C6500	8348547153	S06G5	146	90	S06G5	主梁
	193.3535099	951.8644333	622.2805023	1C6500	8348547153	S06G5	146	90	S06G5	主梁
	166.0545588	910.2952957	622.4034309	1C6500	8348547153	S06G5	146	90	S06G5	主梁

表 4-16 Blender 之物件資訊(懷客橋)



圖 4.22 Blender 之物件資訊寫入判斷

橋梁構件資訊是根據構件編碼原則(圖 4.23)來制定,目前規劃將 Blender 的物件資訊欄位 idx 4 保留為構件編號。經過測試及討論,目前針對構件編號之編碼轉換公式有 3 種方案,說 明如下:

 為使用 16 進位的色碼欄位,在此將其設定為構件編號欄位,目前規劃以下列之轉換公式 來解讀其編碼(表 4-17),而位元1及位元2所代表的 56 個構件,可以依據構件資料中英對 照(表 4-18)之 56 個構件資訊來編寫。

- 2. 為使用 10 進位的數字欄位,以 ASC II 進行轉換(表 4-17(b)),雖然 ASC II 以 10 進位表示 需要 3 個位數才能完整表示所有 95 個字元(數字、基本符號、英文大寫、英文小寫)及指 令,在橋梁構件編號中只需要以 2 位數轉換出涵蓋英文大寫字型、數字及各種基本符號就 足以命名所有構件編號,由於數字欄位在小數點前後至少有 17 位數,可以針對 8 個字元 的構件編號進行編寫。
- 為在 Blender 物件資訊欄位中加入文字字串欄位(表 4-17),可直觀的直接輸入構件編號, 預計應該在文字字串資料欄位輸入足夠之字元來涵蓋所有的構件編號。

實際測試後,本研究建議以方案3為最後採用之方式。



表 4-17 Blender	中之構件編號轉換公式
----------------	------------

(a)			1 m	86.00 D1		ide0	ide 1	ide?	idy3	idvá	ides	ide6
(C)			1	D6-1 1D6-2		Seg	X(ffr(cm)	v佳(cm)	机 相 岩 志 定 (cm)	提供编码3	統向首	宝台首度
十字	1-0-0		16	35-1 //// 1B5-2		55	7169.615936 7	677.471924	2529.155922	\$06G1	138	90
义子	• 積1	牛編碼轉換	1	D5-1 1D5-2		56	7136.607361 7	640.574646	2530.19104	S06G1	138	90
かわ		1 1 11111 1118 114 881	16	34-1 /// 1B4-2		57	7103.598022 7	603.677368	2531.226158	\$06G1	138	90
子串	✓文	字字串	1	D4-1 1D4-2	-	58	7070.588684 7	566.779327	2532.261467	506G1	138	90
	17	1	橋孔1 180101111	3-1 enter 1B3-2 enter		59	7037.580109	7529.88205	2533.296585	\$06G1	138	90
欄位	✓ 至	少10 位元		D3-1 //// 1D3-2 /////	100	60	7004.571533 7	492.984772	2534.331703	506G1	138	90
1010 1-	17	+++ 107 +++ •	15	32_1 1B2_2	-	61 6	5971.562195 7	456.08/494	2535.366821	S06G1	138	90
	V T	拍照的局 U	× 1	D2-1 1D2-2		62 6	5908.973694 /	512.688446	2536.564636	686-1	138	90
			1	21 1 1P1 2		64 6	783 796692 7	625 889587	2538.960075	000-1	130	90
			x 1	D1-1 1D1-2	_	65 (	5783.796692 7	625.889587	2538.960075	0	101	90
				橋台 A1		66 (	5783.796692 7	625.889587	2538.960075	0	66	90
						67 (	5783.796692 7	625.889587	2538.960075	0	29	90
						68 (	5783.796692 7	625.889587	2538.960075	0	-5	90
	節例	• 樯幅辺 D	· 1D3-1			69 6	5783.796692 7	625.889587	2538.960075	\$06G2	-42	90
	401/3		. 105 1			70 (	5816.812134 7	662.758636	2537.984657	\$06G2	-42	90
		• 橋孔S 主	梁G:S01G1			71 0	5849.827576 7	699.626923	2537.00943	\$06G2	-42	90
						72 0	5882.843018 7	736.495972	2536.034012	\$06G2	-42	90
		• 橋墩 P :	P1			73	5915.858459 /	773.364258	2535.058784	50662	-42	90
			CDC 1			74	5981 890106 7	847 101593	2533 108139	50662	-42	90
		• 間田  B	: 6B6-1			76	7014.905548 7	883,970642	2532.132721	506G2	-42	90
						77	7047.92099 7	920.838928	2531.157494	\$06G2	-42	90
	100-00-0		and the state			78	7080.936432 7	957.707977	2530.182076	\$06G2	-42	90
	• BI	ender物件	資訊(台61)			79	7113.951874 7	994.576263	2529.206848	\$06G2	-42	90
	DI	chiachibiti				80	7146.967316 8	031.445313	2528.23143	\$06G2	-42	90
	ldx0	idx1	idx2	idx3	id	x4	idx5	i	dx6	實	際構作	ŧ
	Seq	X值(cm)	y值(cm)	相對高度(cm)	構件編	編碼3	航向角	雲台	<b>)角度</b>	構件編	號林	<b>冓件</b>
	61	6971.562195	7456.087494	2535.366821	S06	6G1	138	8 90		S06G	1 3	主梁
	62	6908,973694	7512,688446	2536,564636	6B6	5-1	138		90	6B6-1	橋	<b></b> 面板
	64	6783.796692	7625.889587	2538.960075	(	)	137		90	NA (無	ŧ人機	轉向)
	69	6783.796692	7625.889587	2538.960075	S06	6G2	-42		90	S06G	2 3	主梁
No	資料表名稱	資料表名稱(中)	車行橋 使用	箱涵 使用	桁架橋 特殊構件	拱橋 特殊構件	吊橋 特殊構件	斜張橋、脊背 橋特殊構件				
----	------------------	-------------	-----------	----------	-------------	------------	------------	-----------------				
1	inventory	基本資料主表	Y	Y								
2	extended	詳細/擴建資料表	Y	Y								
3	approach_bank	引道路堤	Y	Y								
4	approach_guard	引道路堤護欄	Y	Y								
5	approach_protect	引道路堤保護措施	Y	Y								
6	waterway	河道	Y	Y								
7	found_protect	護床工	Y	Y								
8	abutment_fund	橋台基礎	Y									
9	abutment	橋台	Y									
10	headwall	端牆		Y								
11	wingwall	翼牆/擋土牆	Y	Y								
12	drainages	橋梁排水設施	Y	Y								
13	guardrail	橋護欄	Y	Y								
14	expansion	伸縮縫	Y									
15	bearing	支承/支承墊/阻尼裝置	Y									
16	brake	防落設施	Y									
17	pier	橋墩	Y									
18	midwall	中隔板		Y								
19	pier_protect	橋墩/橋基保護設施	Y									
20	pier_fund	橋墩基礎	Y									
21	column	橋墩/帽梁	Y									
22	column_bracing	側向支撐	Y									
23	pylon	橋塔	Y				Y	Y				
24	pylon_fund	橋塔基礎	Y				Y	Y				
25	pylon_anchor	鋼纜錨碇裝置(橋塔端)	Y				Y	Y				
26	main_cable	鋼纜(吊索)-主纜索	Y				Y					
27	main_cable_cover	鋼纜保護套管-主纜索	Y				Y					
28	span	橋孔	Y	Y								
29	node	節點	Y		Y							
30	top_chord	上弦	Y		Y							
31	bottom_chord	下弦	Y		Y							
32	end_post	末端支撑柱	Y		Y							
33	verticals	直桁	Y		Y							
34	diagonals	斜桁	Y		Y							
35	strut	撑柱	Y		Y							
36	bracing	斜撐	Y		Y							
37	floor_beam	板梁	Y		Y							
38	girder	主梁	Y									
39	beam	橫隔梁	Y									
40	joist	托梁	Y									

表 4-18 橋梁構件資料中英對照表

No	咨拟未久储	咨判未久裕(由)	車行橋	箱涵	桁架橋	拱橋	吊橋	斜張橋、脊背
110	其什么石柄	真竹衣石柄(1)	使用	使用	特殊構件	特殊構件	特殊構件	橋特殊構件
41	lateral_bracing	斜撐	Y					
42	slab	橋面板	Y					
43	top_slab	頂板						
44	bottom_slab	底板						
45	stay_cable	鋼纜(吊索)-斜張鋼纜	Y					Y
46	stay_cable_cover	鋼纜保護套管-斜張鋼纜	Y					Y
47	stay_cable_anchor	鋼纜錨碇裝置(主梁端)	Y					Y
48	suspender	吊索	Y				Y	
49	suspender_cover	鋼纜保護套管-吊索	Y				Y	
50	arch	拱肋(拱圈)	Y			Y		
51	arch_susp	鋼纜(吊索)-吊材	Y			Y		
52	arch_susp_cover	鋼纜保護套管-吊材	Y			Y		
53	arch_susp_anchor	鋼纜錨碇裝置(吊材)	Y			Y		
54	arch_column	立柱	Y			Y		
55	crossbeam	横桿	Y			Y		
56	others	其他	Y	Y				

本研究以花蓮縣懷客橋及嘉義縣布袋港附近的台 61 線橋梁,在 Blender 進行路線規劃模擬 動畫,在進行航線規劃時,無人機之飛行安全列為首要注意事項,以無人機中心為圓點畫出半 徑為 3 至 3.5 公尺的球型為無人機與實體物件之安全距離(表 4-19),亦即 3D 模型中的任何實 體物都要位在此安全距離範圍外。以大梁為拍照對象之航線規劃(表 4-20),是以大梁中線為參 考線,向下 3 公尺畫出大梁航線,以 Sony A7R4 及 50 mm 鏡頭為例,則可以得到 GSD 約 0.3 mm、相幅約 2.1x1.4 m 的影像。以橋面板為拍攝對象之航線規劃(表 4-20),由於還是需要保持 與大梁 3 公尺距離,此時大梁高度如果是 2 公尺,則是以橋面板向下 3+2=5 公尺距離劃出大 梁航線,則可以得到 GSD 約 0.4 mm、相幅約 3.6x2.4 m 的影像。航線規劃預定每秒拍 1 張照 片,無人機航速約 0.5 m/s。在模擬動畫中,可於畫面左上角看到目前序列編號及構件編號(表 4-21),目前設定之顯示方式序列編號(如 1160、718、752),而構件編號則是該構件第一次出現 時會跳出構件編號,如橋面板<6B4-8>、大梁<S06G5>或是機頭轉向不拍照時的<0>,後續之構 件編號如果沒有變更則不顯示。該示意圖中顯示之 fps: 5,乃是將動畫模擬速度以 5 倍數播放 時,每秒會產生 5 個序列編號及 5 張影像,實際作業仍以每秒拍照 1 張進行規劃。

表 4-19 設定無人機安全距離

圖 例			
說	以無人機中心半徑3至	以棒涩側面斷面為參去面	以帽涩為兔老而
明	3.5 公尺的安全距離	~ ~ 個 小 内 面 圖 面 闷 多 马 面	~ 旧小心多马 四

表 4-20 無人機航線規劃模擬動畫

	PCI 梁主梁	PCI 梁橋面板	箱型梁
懷客橋			無
			無
	以大梁中線為參考線	大梁高度2m	無
	向下 3~3.5 m 畫出大梁航	橋面板向下 3+2 m 畫出	
	線	大梁航線	
	GSD 約 0.3 mm	GSD 約 0.4 mm,相幅約	
	相幅約 2.5x1.7 m	3.6x2.4 m	
		橋面板寬度約 1.45 m	
		航線間距約 0.7 m	
		側向重疊度約 80%	
台 61 近 布 袋			
港			

PCI 梁主梁	PCI 梁橋面板	箱型梁
以大梁中線為參考線	大梁高度 2.3 m	大梁寬度約 14 m
向下 3~3.5 m 畫出大梁航	橋面板向下 3+2.3 m 畫出	向下 3~3.5 m 畫出大梁航
線	大梁航線	線
GSD 約 0.3 mm	GSD 約 0.4 mm	GSD 約 0.3 mm
相幅約 2.5x1.7 m	相幅約 3.8x2.5 m	相幅約 2.5x1.7 m
	橋面板寬度約 1.2 m	航線間距約 0.5 m
	航線間距約 0.6 m	側向重疊度約80%
	跨越大梁之航線間距2m	
	側向重疊度約 84%	

#### 表 4-21 無人機模擬動畫中序列編號及構件編號



本次選擇進行測試作業之台 61 線位於布袋港附近之橋梁,其橋梁位置之周圍環境(圖 4.24) 為附近快速道路橋梁之較佳選擇,其橋面板、大梁、橫隔梁等之構件編號(圖 4.25),與 Blender 航線規畫之物件資料(表 4-22)可互相比對,即可由物件資料看出航線規劃方式。

◆ 橋梁下面實測場域:已申請取得空拍作業空域(8/10-11/9/2022・11/8/2022-2/5/2023)
 ✓ 台61:23.3819167,120.1591167・接近布袋第二及第三漁港・橋寬約 22.13公尺



圖 4.24 台 61 線近布袋漁港之橋梁



圖 4.25 台 61 線近布袋漁港橋梁之構件編號

表 4-22 台 61 線近布袋漁港橋梁路徑規劃之 Blender 物件資料

idvO	idy1	idy?	idy2	idy/	idy5	idy6	安臣	又堆从
luxu				IUX4	IUXJ	IUX0	貝乃	下伸什
Seq	X 值(cm)	y 值(cm)	相對咼皮(cm)	構件編碼 3	航向角	雲台角度	編號	名稱
		PCI	梁大梁航線規劃之	Blender 物件	丰資料			
60	7004.571533	7492.984772	2534.331703	S06G1	138	90	S06G1	大梁
61	6971.562195	7456.087494	2535.366821	S06G1	138	90	S06G1	大梁
62	6908.973694	7512.688446	2536.564636	6B6-1	138	90	6B6-1	跨過橋面
63	6846.385193	7569.288635	2537.76226	6B6-1	138	90	6B6-1	板往大梁
64	6783.796692	7625.889587	2538.960075	0	137	90	NA (無	人機轉向)
65	6783.796692	7625.889587	2538.960075	0	101	90	NA (無	人機轉向)
66	6783.796692	7625.889587	2538.960075	0	66	90	NA (無	人機轉向)
67	6783.796692	7625.889587	2538.960075	0	29	90	NA (無	人機轉向)
68	6783.796692	7625.889587	2538.960075	0	-5	90	NA (無	人機轉向)
69	6783.796692	7625.889587	2538.960075	S06G2	-42	90	S06G2	大梁
70	6816.812134	7662.758636	2537.984657	S06G2	-42	90	S06G2	大梁
71	6849.827576	7699.626923	2537.00943	S06G2	-42	90	S06G2	大梁
72	6882.843018	7736.495972	2536.034012	S06G2	-42	90	S06G2	大梁
		PCI 챩	兴橋面板航線規畫:	之 Blender 物	件資料			
747	5625.960541	8733.283997	2523.189545	6B6-8	138	90	6B6-8	橋面板
748	5596.110916	8699.943542	2524.080849	6B6-8	138	90	6B6-8	橋面板
749	5631.752777	8667.711639	2525.522041	S06G8	138	90	S06G8	跨過大梁
750	5667.39502	8635.479736	2526.963234	S06G8	138	90	S06G8	前往下個
751	5703.037262	8603.248596	2528.404427	S06G8	138	90	S06G8	橋面板
752	5738.679123	8571.016693	2529.845619	0	137	90	NA (無	人機轉向)
753	5738.679123	8571.016693	2529.845619	0	102	90	NA (無	人機轉向)
754	5738.679123	8571.016693	2529.845619	0	66	90	NA (無	人機轉向)
755	5738.679123	8571.016693	2529.845619	0	30	90	NA (無	人機轉向)

idx0	idx1	idx2	idx3	idx4	idx5	idx6	實際	<b>紧構件</b>
Seq	X 值(cm)	y 值(cm)	相對高度(cm)	構件編碼3	航向角	雲台角度	編號	名稱
756	5738.679123	8571.016693	2529.845619	0	-5	90	NA (無	人機轉向)
757	5738.679123	8571.016693	2529.845619	6B6-7	-41	90	6B6-7	橋面板
758	5768.437958	8604.250336	2528.973007	6B6-7	-41	90	6B6-7	橋面板
759	5798.196411	8637.483978	2528.100586	6B6-7	-41	90	6B6-7	橋面板
760	5827.954865	8670.717621	2527.228165	6B6-7	-41	90	6B6-7	橋面板
761	5857.713699	8703.951263	2526.355553	6B6-7	-41	90	6B6-7	橋面板
762	5901.346588	8752.677917	2525.076103	6B5-7	-41	90	6B5-7	橋面板
763	5933.794022	8788.91449	2524.124718	6B5-7	-41	90	6B5-7	橋面板
764	5966.241074	8825.150299	2523.173332	6B5-7	-41	90	6B5-7	橋面板
		箱型	梁大梁航線規畫之	L Blender 物作	牛資料			
2308	2879.381943	5141.87355	2504.942322	S07G1	138	90	S07G1	大梁
2309	2846.125984	5104.685211	2505.350876	S07G1	138	90	S07G1	大梁
2310	2812.870026	5067.496872	2505.759239	S07G1	138	90	S07G1	大梁
2311	2850.041199	5034.189224	2505.902672	0	137	90	NA (無	人機轉向)
2312	2850.041199	5034.189224	2505.902672	0	102	90	NA (無	人機轉向)
2313	2850.041199	5034.189224	2505.902672	0	66	90	NA (無	人機轉向)
2314	2850.041199	5034.189224	2505.902672	0	30	90	NA (無	人機轉向)
2315	2850.041199	5034.189224	2505.902672	0	-5	90	NA (無	人機轉向)
2316	2850.041199	5034.189224	2505.902672	S07G1	-41	90	S07G1	大梁
2317	2883.298492	5071.373367	2505.494308	S07G1	-41	90	S07G1	大梁
2318	2916.555595	5108.557129	2505.085754	S07G1	-41	90	S07G1	大梁
2319	2949.812889	5145.741272	2504.677391	S07G1	-41	90	S07G1	大梁

#### 4.8 橋檢無人機設計製作與測試成果

依據過去執行無人機橋梁檢測測試的經驗及相關文獻回顧,目前市面上沒有現成完全符合 需求之商用橋梁巡檢無人機,因此本研究規劃設計之橋梁檢測專用無人機,考慮到酬載能力、 能源效率以及各種拍攝方向之巡檢需求等,以 Y6(三軸六槳)多旋翼構型設計兩種軸距(850 mm 及 1200 mm)的多旋翼無人機(如圖 4.26,圖 4.27),最大酬載能力為5kg,最大起飛重量小 於 15 kg 之 Y6 多旋翼無人機,抗風能力可達 5 級。同時考慮到無人機橋梁巡檢的飛行環境複 雜度,本橋梁巡檢無人機將搭載水平 360 度以及上下方單線式的防撞 LiDAR,確保無人機在 飛行過程中,與橋梁及周邊障礙物保持安全距離,避免發生擦撞、損傷。此無人機之飛行控制 與監控系統(圖 3.48)使用 MIT 國產開源 Pixhawk TD-H7CPO 飛控系統作為無人機的自動駕駛 系統(Autopilot),搭載高效能協作電腦(Companion Computer)(如 Intel NUC)及相關設備(如立體 相機,UWB,多星系衛星接收器)(圖 4.30)進行橋面下方無 GNSS 訊號之定位導航運算,透過 4G/5G 通訊模組與地面站及雲端伺服器連線,即時將無人機狀態回傳,並可隨時透過網路進行 任務路徑修改或緊急處置等。 Y6 多旋翼的特殊構形可以將巡檢用的相機(如 SONY A7R4 或其他可提供足夠解析度及 GSD 的相機,表 4-23)掛載於機身前緣,搭配自製相機雲台來控制相機拍攝下方、前方及上方 等方位的橋梁構件,並於雲台下方搭載可程式控制之高亮度 LED 補光照明設備,用於拍攝橋 下光源不足之情境使用,相機將依任務需求選擇搭載之鏡頭,搭載 15 mm 鏡頭拍攝用來拍攝 低解析影像,搭載 50 mm 鏡頭則用來拍攝高解析影像,如裂縫等細小劣化類別。



圖 4.26 軸距 850 mm 之多旋翼無人機 TD-Y6B-850



圖 4.27 軸距 1200 mm 之多旋翼無人機 TD-Y6B-1200

Sony A7R4	鏡頭規格	Voigtlander 15mm F4.5 ASPH III VE	Voigtlander 50mm F1.2 ASPH VE	Sony FE 50mm F2.5G SEL50F25G
SONX 7 7				
• 6100 萬像素(9,504x6,336)	光圈	4.5 ~ 22	1.2 ~ 22	2.5 ~ 22
•錄影 4K 30p (3,840x2,160)	鏡頭結構	9組11片	6組8片	9組9片
• 35mm 全片 福(35.7x23.8mm)	視角(度)	110	47.5	47
• Exmor R CMOS 感光元件	最小焦距	0.3 m	0.45 m	0.35 m
• 快門 1/8000-30s,10 fps		直徑 66.4	直徑 70.1	直徑 68
• ISO 100-32,000	尺寸	mm,長 62.3	mm,長 58.8	mm,長
• W128.9*H95.4*D77.5 mm		mm	mm	45mm
<ul> <li>機身內建5軸影像穩定系統</li> </ul>	濾鏡直徑	58 mm	58 mm	49 mm
• 防震動機械設計	重量	262 g	434 g	174 g
• 4D Focus	對焦	手動	手動	自動
• 雙記憶卡插槽,支援 UHS-II	Exif	V	V	V
• JPEG • RAW	回海绥户	支援5軸圖像	支援5軸圖	支援機身穩定
• 0-40 °C • 665 g	回怀稳疋	穩定	像穩定	系統

表 4-23 預計搭載於橋梁巡檢無人機之相機及鏡頭規格

本研究已對這兩款之多旋翼無人機進行各式測試(圖 4.28),包括調整 PID 參數、測量最大 起飛重量、酬載重量、耐久性(停懸時間,空載停懸及搭載假酬載停懸)、巡航速度、最大航速、 上升下降速度、最大航行距離、前進後退等等。同時量測各酬載及配件之重量(表 4-24),在進 行設備整合時,依整體重心配置、線材、作業需求及性能需求調配最佳安裝方案。每次測試都 會填寫多軸專用紀錄表(表 4-25),詳細記錄測試時間、地點、風速風向、電變、電池、螺旋槳、 馬達、全機重量、負載重量、測試項目、飛行檢查表、飛航軌跡、測時時之電壓電流變化等資 料。



組裝無人機 硬體



寫入韌體及 參數



調校 PID 數值



遙控器測試飛機 性能



透過4G進行路徑測試

圖 4.28 多旋翼無人機製造測試流程

		重量 (kg)					
850 +1 乗	頃 T-Drones 6S 22000mAh 電泳	也 + 雲台	5.7				
1200 + 2 =	顆 T-Drones 6S 22000 mAh 電	池 + 雲台	12.4				
Sony A7R4	Sony A7R4 Voigtlander F1.2 50 mm Sony FE F2.5G 50 mm						
665 g	434 g	174 g					
視覺融合定	位模組 (Intel NUC + RealSens	se D455+線材)	$0.7 \sim 0.8$				
	Intel NUC 整流器		0.263				
	預計無人機及酬載之整體重		重量 (kg)				
(850+1 顆 T-Drones 6S 2	2000 mAh 電池 + 雲台) = 5.	7 kg	~8.1 kg				
Sony A7R4 相機 +5	0mm 鏡頭 = 0.839-1.099 kg						
視覺融合定位+整流	器 =1 kg						
燈光 =0.38 kg							
(1200 + 2 顆 T-Drones 6S	22000 mAh 電池 + 雲台) = 1	2.4 kg	~14.8 kg				
Sony A7R4 相機 +5	0mm 鏡頭 = 0.839 ~ 1.099 kg						
視覺融合定位+整流	器 = 1 kg						
燈光 =0.38 kg							

# 表 4-24 多旋翼無人機及其相關酬載之重量

<ul> <li>飛測日期</li> <li>風向</li> <li>機型</li> <li>飛測人員</li> </ul>	<b>臺灣</b> 2022/01, 麗手:	た 空創新 が 1 hr:mm Test:01 地面:	的一个的一个的一个的一个的一个。 股份有限 飛測地點 風速 機型編號 站:	多触專用 成本:20 <b>&amp;公司</b> 死錄:	紀録表 )220504 <b>m/s</b>	F1	ight Da	<del>飛行</del> ta節	紀錄 圖畫面黍	占貼於	此	
<u>飛控</u> 電變 螺旋紫 全機重量 飛測任務概.		<b>規格</b> : Kg/全量: Kg 負載相關資	<ul> <li>決</li> <li>GPS</li> <li>電池</li> <li>馬達</li> <li>負載重量</li> <li>訊(含遙拉言、鏡頭</li> </ul>	、 <i>剛架等</i> )	(Kg)			1- L- 88	The star has been			
<u>流程</u> 1 能 打 2 螺旋线	<u>读查部件</u>	飛行檢 磁力計校正 確認安裝方向	1查表 項目	飛行前 身	藏行後		飛 (如航線規畫	们、航速、	備註紀錄	警告等)		
3 螺旋り 4 螺旋り 5 馬 ± 6 馬 ±		外觀確認有無裂損 確認固定螺絲鎖緊 外轉子轉動/外觀有 確認螺絲有無鎖緊 检查電影	無異常	(V)		起飛前電壓 起飛30秒電壓		测试 (VDC) (VDC)	<b>數據</b> 飛行高度 平均油門		~	(m)
· · · · · · · · · · · · · ·	5 1 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	▲ 查外觀/安裝是否 續這已回裝差否 確認理能有無鎖差緊 外觀確認已回裝差當 外觀確認已回裝差當 外觀確認已回裝差當 外觀確認已回裝差當	しています。 安富 う う う う う う う う う う う う う			飛行時間(min)	€是(V) €流(A	) <u></u> <u></u>	<b>飛行時間(min)</b>	<b>電</b> 歴(V)	€流(A) <b></b>	行距離
15 電系者 16 泉 17 泉 泉 18 泉 泉 月 20 場 月 21 場	を頭 と と と と と	■ u add the set of the set o	電檢查 通訊品質: 顆数: HDOP: 位是否正確	%								
		準備; 三合 補充检查項目請填方	起飛 令此處 令此處			降落電壓 降落10min電壓		(VDC) (VDC)	總飛行時間 總飛行距離		(	(min) Km/m)

表 4-25 多軸無人機測試專用紀錄表

			Ďne			禄表 0504	2 - main			飛行	紀錄			
	臺灣	希望創新	股份有	限公司	1			00			AROUCI			
微测日期	2027/0	7- 14 :00 Test: D2	發測地點	喜族金属	25		DIS	ARMED		-	man and	1 con	-	
展向	0.70.0	ta	周语	3	07	m/s			- 0	Se Tr	- N		142	
Line all	86	191 FTA + 63 (151)	عد مد الد غد			<u>m/ 5</u>	S - Barry Free	gran E			16 10		252	
機坐	D f	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	被空調致	4.40 1	DO th	- 1	100-2435 - 300-	ALC: NO. MARKING	1		S. 4 4 38	1000		
飛渕人員	一 飛 于:	中别名色 地面	站:种的物物	紀錄: //	日月草刻		Alloca 201 (1000)	adjustical Patricip	163					
	State La	規格	<b>}表</b>	A CONTRACTOR		100	2.01 (	Lovenus Matting	128					
飛控	Hex (4)	be orange	GPS	Hex Hos	ve 3		108.22 C	0.04 -4.09			and Autom			
**	T-Notor	ATRIWALS	**	Total bs	16000 10 44	LEV	61.95 1		200		1 1			
調告將	TULLOY	MEION	E.M	TAL HOF ALL	1-200 k1/2/		22.55 C	0.11 1317.0		terme to g	ALL STATES			
新花茶	1-1001	mr (Bus	同进	PMOTO IN	5000 1034	W N			-	anne its Pres				
TREE	+383	C: SYN Ag/ TH: >. VAg	貝戰里里		(	( <u>Ag</u> )								
<b>之测任務概</b> 过	E IP	P充 12 31												
they have														
		飛行槍	***						能不	丁相關				
流程 檢	查部件		項目		飛行前 飛行	行後				、航速、		警告等)		
1 10 14				and the second se										
飛 挖		磁力計校正		-										
2 螺旋紫		磁力計校正 確認安裝方向			VV									
1 <u>飛 控</u> 2 螺旋槳 3 螺旋槳		磁力計校正 確認安裝方向 外觀確認有無裂損			14					测试	款據			100
1         飛 控           2         螺旋紫           3         螺旋紫           4         螺旋紫		磁力計校正 確認安裝方向 外觀確認有無裂損 確認固定螺絲鎖緊	40 MP 464		144		把發前電壓	24	08	测试: (VDC)	款據 發行高度	5.	1	
2		磁力計校正 確認安裝方向 外觀確認有無裂損 確認固定螺絲鎖緊 外轉子轉動/外觀有	無異常		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1		起飛前電壓	26	6.08	测试: (VDC)	款據 飛行高度	5-		
1 2 2 3 3 二 環旋紫 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5		磁力計校正 確認安裝方向 外觀確認有無裂損 確認固定螺絲鎮緊 外轉子轉動/外觀有 確認螺絲有無鎮緊 论委者原	魚異常	4 (V)	444K/		起飛前電壓 起飛30秒電壓	26 24	80	测试: (VDC) (VDC)	數據 飛行高度 平均油門	5-  35	 ^~	1417
1 2 2 3 3 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5		磁力計校正 確認安裝方向 外說。確認有無裂損 確認固定螺絲鎖緊 外轉子轉動/外觀有 確認螺絲有無鎖緊 檢查於腳/空裝具石	無異常 電池電壓: <u>26.0</u>	\$_(V)	44444		起飛前電壓 起飛30秒電壓 飛行時間(min)	2.6 24 \$\$(V)	.08 80 €流(A)	测试: (VDC) (VDC) 飛行距離	兼 推 音 度 平 均 油 門 飛 行 高 度 一 や 均 油 門 飛 行 高 度 一 の 油 門 - 一 の 油 門 - - - - - - - - - - - - -	5-  35 \$&(V)	/ <sup>1</sup> 0~/ 電流(A)	1417 魚行a
1 2 3 3 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5		磁力計校正 確認安裝方向 外觀確認有無裂損 確認固定螺絲頻繁 於轉子轉動/外觀有 確認螺絲有無頻繁 檢查外觀/安裝是否 外觀確認只因素否	無異常 電池電壓: <u>26.0</u> 妥當	<u>% (V)</u>	  		起飛前電壓 起飛30秒電壓 飛行時間(min) 2	26 24 \$\$(V) 74.20	<ul> <li>08</li> <li>80</li> <li>€流(A)</li> <li>28.6</li> </ul>	测试: (VDC) (VDC) 飛行距離	兼據       飛行高度       平均油門       飛行時間(min)	5-  35 CE(V)	/ <sup>0</sup> ~/ 電流(A)	1417 飛行3
1 2 3 3 4 5 5 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5		磁力計校正 確認安裝方向 外觀確認有無裂損 確認固定螺絲鎮緊 外轉子持動/外觀有 磁認螺絲有無鎮緊 檢查介觀/安裝是否 外觀確認已固裝妥引 確認螺絲有無顧緊	無異常 <u>電</u> 池電歴: <u>26.0</u> 安當 皆	<u>8</u> (V)	  		起飛前電壓 起飛30秒電壓 飛行時間(min) 3	26 24 <b>EE(7)</b> 2435	<ul> <li>08</li> <li>80</li> <li>€m(A)</li> <li>28-6</li> </ul>	测试; (VDC) (VDC) 発行距離	款據 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)	5-  35 CE(V)	/ ~ / 笔流(A)	1417 兼行和
1 2 2 3 3 3 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	副載	磁力計校正 確認安裝方向 外觀確認有無裂損 確認固定螺絲鎖緊 外棘子轉動/外觀有 检查電壓 檢查外觀/安裝是否 外觀確認已固裝妥引 確認螺絲有無類 外範確認已固裝妥引	無異常 電池電壁: <u>26</u> 0) 妥當 <sup>2</sup>	§ (V)	<pre></pre>		起飛前電歴 起飛30秒電歴 飛行時間(min) 3 し	2.6 24 <b>EE(V)</b> 24,35 23.71	<ul> <li>.08</li> <li>.8°</li> <li>€m(A)</li> <li>28.6</li> <li>28.7</li> </ul>	测试; (VDC) (VDC) 飛行距離	教 <mark>雄</mark> 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)	5-  35 CE(V)	/ <sup>~</sup> ~/ 毫流(A)	1417 飛行和
1	副載	磁力封校正 確認安裝方向 外戰僅認有無景損 確認螺絲有魚損損 確認螺絲有魚損繁 检查外觀/安累是否 外觀確認已回累妥查 確認螺絲有魚頻繁 外觀或認已回累妥查 確認螺絲有魚頻繁 外戰確認已回累妥查	無異常 電池電壓: <u>26.0</u> 安當 皆 皆	₹_(V)			<u>起飛前電歴</u> 起飛30秒電歴 飛行時間(min) し 好	26 24 <b>EE(V)</b> 2435 23-7/ 22-25	28.6 28.7 29.7	测试: (VDC) (VDC) 飛行距離	款據 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)	5-  35 C&(Y)	/ <sup>0</sup> ~/ €流(A)	1417 泉行知
1	副載	磁力封校正 確認安裝方向 外觀碼這方無景損 確認固定螺絲續緊 检查意應 检查查來總/安裝是否 介胞確認已因裝是 外胞確認已因裝是 外胞確認已因裝是 外胞確認已因裝是	無異常 電池電壁: <u>26-0</u> 安雪 皆 皆 安雪		< < < < < < < <td></td> <td>起飛前電歴 起飛30秒電壓 飛行時間(min) 子 し g</td> <td>26 24 <b>EE(V)</b> 2435 23-7/ 23-25</td> <td>€.08 .80 € m(A) 28-6 28-7 29.3</td> <td>测试: (VDC) (VDC) 飛行距離</td> <td><b>款接</b> 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)</td> <td>5-  35 CE(Y)</td> <td>/ ~ / 電流(A)</td> <td>1417 泉行町</td>		起飛前電歴 起飛30秒電壓 飛行時間(min) 子 し g	26 24 <b>EE(V)</b> 2435 23-7/ 23-25	€.08 .80 € m(A) 28-6 28-7 29.3	测试: (VDC) (VDC) 飛行距離	<b>款接</b> 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)	5-  35 CE(Y)	/ ~ / 電流(A)	1417 泉行町
1	副载	磁力封校正 確認要裝方向 外觀確認有無影損 確認固定螺結構算 检查了整 检查外觀/安裝是否 外觀確認已固某会 体验或於與/安裝是否 外觀確認已固某会 外觀確認已固某会 外觀確認已固某会 外觀確認已國某会 外觀確認已國某会 不能就成成已國某会	無異常 電池電壓: <u>26.0</u> 安書 皆 皆 皆 影 後當		<pre>&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&gt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&gt;&lt;&lt;&lt;&gt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&gt;&lt;&lt;&lt;&lt;&gt;&lt;&lt;&lt;&lt;</pre>		<u>起境前電歴</u> 起境30秒電歴 飛行時間(min) <u>3</u> し 7 上	26 24 <b>EE(V)</b> 24,35 23.71 23.25 22.63	€.08 8° €m(A) 28.6 28.6 28.7 29.3 29.4	测试; (VDC) (VDC) 飛行距離	款據 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)	5-  35 C&(Y)	/ ~ / 電流(A)	1417 飛行期
1	副載	磁力封校正 確認安裝方向 外觀確認有急見損 確認固定螺熱頻整 內種子轉動/外觀式 確認螺絲有無頻整 檢查意外觀/安裝差否 檢查外觀/安裝差否 物範確認已圓裝差 確認螺結成已圓裝差 確認照信成已圓裝差 確認照信成已圓裝差 確認見管案圓	無異常 電池電 <u>壁: 26-0</u> 要書	\$_(V)	<pre>&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&gt;&lt;&lt;&lt;&gt;&lt;&lt;&lt;&gt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&gt;&lt;&lt;&lt;&lt;&lt;&gt;&lt;&lt;&lt;&lt;</pre>			2.6 24 <b>EE(V)</b> 24.35 23.71 23.25 22.63 22.63	<ul> <li>28.6</li> <li>28.7</li> <li>29.3</li> <li>29.4</li> <li>20.1</li> </ul>	测试 (VDC) (VDC) 発行距離	款嫁 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)	5- 135 CE(Y)	/ <sup>(</sup> ~ / 電流(A)	1417 泉行3
1         械裝裝           2         螺旋裝           3         螺旋裝           5         馬馬電           6         馬電           7         電電           9         機費           10         機費           12         完集           13         規定           14         GPS           15         電系長	酬載	磁力衬板正 確認要設方向 外觀確認方無見損 確認固定螺絲續 物構之轉為/頻累 检查意樂 检查小觀/安累是否 件胞確認已因累妥 外胞確認已因累妥 外胞確認已因累妥 外胞確認已因累妥 体認訊就像と因累呈 外胞確認已且累妥 機能送否牢因 載具供:	魚具常 電池電 <u>度: 26.0</u> 安全 皆 皆 を含 皆 を含	\$(V)	<td></td> <td>起義前電歴 起機30秒電歴 歳行時間(min) 3 6 () 1 2 () () () () () () () () () ()</td> <td>2.6 24 24.35 23.71 23.25 22.63 22.22</td> <td>28.6 28.7 29.3 29.4 30.1</td> <td>测试; (VDC) (VDC) 発行距離</td> <td>款線 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)</td> <td>5-  35 \$&amp;(Y)</td> <td>/ <sup>(</sup>~ / 電流(A)</td> <td>1417 飛行和</td>		起義前電歴 起機30秒電歴 歳行時間(min) 3 6 () 1 2 () () () () () () () () () ()	2.6 24 24.35 23.71 23.25 22.63 22.22	28.6 28.7 29.3 29.4 30.1	测试; (VDC) (VDC) 発行距離	款線 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)	5-  35 \$&(Y)	/ <sup>(</sup> ~ / 電流(A)	1417 飛行和
<ol> <li></li></ol>	副載	磁力封校正 確認安裝方向 介拠或確認有無見損 增認固定螺熱頻繁 物種子傳動/外觀有 權認螺結有無頻繁 物觀或認己固果会 確認螺結有無頻繁 外胞或這已因果会 確認螺結有無頻繁 外胞或這已因果会 確認是否牢固果会 確認是否牢固果。 微行模式是否正確 電具供 微行模式是否正確	無異常 <u>電池電景: 26.0</u> 安書 警 警 そ 電 電 電 電 電 電 電 電 電 電 電 電 電		\[         \lefty \]     \[         \l		<u> 起</u> 飛前電壓 起 <u>飛</u> 30秒電壓 飛行時間(min) 3 6 9 1 2 1 5 1 5 1 5	24 24 24 24-35 23-71 23-25 22-63 22-22 21-91	28.6 28.6 28.7 29.3 29.4 30.1 30.3	测试, (VDC) (VDC) 発行距離	款線 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)	5- 135 CE(T)	/ ~ / 笔流(A)	1417 泉行系
1         械装熊 张           2         螺旋装熊 张           3         螺旋桨 张           5         馬。違           6         馬。違           9         機會 臂           10         機會 臂           11         機會 星           12         飛客           13         12           14         GPS           15         電系 統           16         系 統           17         系 統	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	磁力封校正 確認安裝方向 外觀確認有無見損 「新規一定螺棒局」 「「「「「「」」」 「「」」」 「「」」」 「「」」」 「「」」」 「「」」」 「「」」 「」」 「「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」 「	無異常 電池電壁: 26-0 安書 警 警 定 全 客 電 電 電 後 金 電 電 電 電 電 一 電 型 電 型 一 電 型 一 電 型 一 電 型 二 電 型 一 電 型 二 電 型 二 電 型 二 電 型 二 電 型 二 電 型 二 電 型 二 電 型 二 二 四 二 四 二 四 二 四 二 四 二 四 二 四 二 四 二 四	(V) (V) (Q) (V)			起境前電歴 超機30秒電歴 最行時間(min) 3 6 9 1 2 1 5 1 2 1	24 24 24-35 23-71 23-25 22-63 22-22 21-91 21-61	<ul> <li>28.6</li> <li>28.6</li> <li>28.7</li> <li>29.3</li> <li>29.4</li> <li>30.1</li> <li>30.3</li> <li>20.5</li> </ul>	测试; (VDC) (VDC) 発行距離	款線 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)	5- 135 EE(1)	/ ~ / 笔流(A)	1 (417) 泉行政
<ol> <li>1 総裁選 紙</li> <li>2 螺旋進 環境</li> <li>3 螺旋進 電気</li> <li>4 螺旋進 電気</li> <li>5 馬馬達</li> <li>6 馬馬</li> <li>7 電電池</li> <li>2 電気</li> <li>2 電気</li> <li>2 電気</li> <li>2 電気</li> <li>2 電気</li> <li>2 電気</li> <li>4 GPS</li> <li>11</li> <li>4 GPS</li> <li>15</li> <li>16</li> <li>2 糸</li> <li>4.</li> <li>17</li> <li>18</li> <li>六</li> <li>糸</li> </ol>	副載	磁力封校正 確認安裝方向 介拠或確認有無見損 傳經認同定讓純繁 外轉子轉動/外觀病 確認經漸有無頻繁 检查查電整 檢查外觀/安裝是否 檢查外觀/安裝是否 外觀或認己國某条何 傳認是否年因 電認訊號線已國某条何 傳想是否年因 電訊號號接通記最条 未 於觀藏違記目裝系 確認記意味是否 情報式是否正導 確認記意味 街星	<ul> <li>無異常</li> <li>電池電歴: 26.07</li> <li>安書</li> <li>管</li> <li>(1 HDC)</li> </ul>					24 24 24-35 23-11 23-25 22-63 22-22 21-41 2.1-63	<ul> <li>5.08</li> <li>8°</li> <li>*m(A)</li> <li>28.6</li> <li>28.7</li> <li>29.3</li> <li>29.4</li> <li>30.1</li> <li>30.5</li> <li>30.5</li> </ul>	测试 (VDC) (VDC) 我行距離	<b>款線</b> <u>飛行高度</u> 平均油門 飛行時間(min)	5-  35 CE(V)	/ <sup>(</sup> ~~/ 毫流(A)	1 ( 八 八 7 7 0 八 八 7 7 0 八 八 7 7 0 泉 行 珥 日 二 八 二 八 二 八 二 八 二 八 二 八 二 八 二 八 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二
<ol> <li>一 総裁提供</li> <li>2 螺旋旋張</li> <li>3 螺旋旋張</li> <li>4 螺旋旋張</li> <li>5 馬、馬、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海、海</li></ol>	副截	磁力封校正 確認安裝方向 外觀確認有急見描 增認固定螺熱頻繁 內種子轉動/外觀有 權這螺絲有高頻繁 外觀確認已固累委任 權認螺絲有高頻繁 外觀確認已固累委任 確認環境在高頻繁 外觀確認已國累委 確認現透線已國累委 確認思想 或是外觀 電話之客唱 電話之客唱 電話之客唱 電話 代相武之客案問 一般行棋式之客	無異常 重池電型: 24-0 要書	<u>\$</u> (V) <u>\$</u> (V) <u>9</u> (7) <u>\$</u> (V) <u>\$</u> (V)			起境30秒電歴 境行時間(min) 3 6 9 1 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	24 24 24 24 23 23 21 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	<ul> <li>28.6</li> <li>28.6</li> <li>28.7</li> <li>29.3</li> <li>29.4</li> <li>30.3</li> <li>30.5</li> <li>30.9</li> </ul>	测试; (VDC) (VDC) 我行距離	款線 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)	5- 135 CE(T)	/ ⑦~ / 電流(A)	1
	<i>副</i> 截 	磁力封校正 確認要裝方向 外觀確認方無見損 確認固定螺絲身角頻 確認固定螺絲身角頻繁 檢查查外觀/安累是否 檢查常範/安累是否 外觀確認已固累差 外觀確認已固累差 外觀確認已固累差 外觀確認已固累差 外觀確認已國累差 所觀/代狀式是否正確 確認取強認品質 增認認定品問累 行前的 Data地關定 和時勤/空	無異常 電池電壓: <u>26.0</u> 安當	949 <u>\$</u> 999 <u>\$</u>			起境前電歴 起境30秒電歴 飛行時間(min) 3 6 9 1 2 1 5 1 5 1 5 1 5 1 5 2 - [ 2 5 7	24 24 24 23-71 23-25 22-63 22-22 21-91 21-54	28.6 28.6 28.7 29.3 29.4 30.1 30.3 30.5 30.5	测试 (VDC) (VDC) 発行距離	款線 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)	5- [35 \$&(Y)	/ つ~) 電流(A)	1417 泉行耳
1	酬載	磁力封校正 確認安裝方向 小觀或磁方魚見損 傳感图定運輸頻整 外種子棒動/外觀索 检查宽壓 檢查外觀/安裝是否 檢查外觀/安裝是否 檢查外觀/安裝是否 檢查的觀/這匹目裝差 確認環線有無頻整 分觀或這匹目裝差 確認思考 電認是否牢固 業具供 成子描成了美工成 建設下點。 會認的下類一般。 力量 的計 Data地圖定 起降點浮空	無異常 電池電壓: <u>26.0</u>	999 <u>5</u> 999 <u>5</u> 91				24 24 24-35 23-1/ 23-25 22-63 22-63 22-63 22-63 21-21 21-63 21-54	<ul> <li>28.6</li> <li>28.6</li> <li>28.7</li> <li>29.3</li> <li>29.4</li> <li>30.1</li> <li>30.5</li> <li>30.9</li> </ul>	测试 (VDC) (VDC) 発行距離	款線 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)	5- 135 \$£(V)	/ ⑦~ / 電流(A)	1417 鬼行耳
	副載	磁力封校正 確認安裝方向 / 乾燥碟認有急損損 確認固定螺絲頻量 检查宽壓 检查宽壓 检查宽壓 检查宽壓 检查的個/安裝是否 检查的個/安裝是否 检查的個/安裝是否 检查的個/安裝是否 检查的個/安裝是否 检查的個/安裝是否 使認思想 考 / 乾麗確認已图表受 / 乾麗確認已图表受 / 乾麗確認已图表 / 乾麗確認已图表 / 乾麗確認 電認是否要 最為 / 化、一、	無異常 重池電壓: 26.0 要書	₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩			起境30秒電歴 現行時間(min) 3 6 9 1 2 1 2 ( 2 ( 2 ( 2 ( 2 5 )	26 24 24-35 23-1/ 23-25 22-63 22-22 21-91 21-54	28.6 28.7 29.3 29.4 30.3 30.5 30.5 30.9	测试 (VDC) (VDC) <i>免行距離</i>	教練 飛行高度 平均油門 飛行時間(min)	5-  35 EE(1)	/ ⑦~ / 電流(A)	1417 <b>ж</b> ти
2 螺旋装 螺旋装 5 - 馬, 这 6 - 馬, 这 6 - 馬, 这 7 - 電, 光 7 - 電, 光 7 - 電, 光 10 - 機 2 - 機 10 - 機 2 - 機 10 - 機 2 - ペ 2 -	朝载	磁力封校正 確認安裝方向 外觀確認方無見損 確認固定螺絲積分無氧 檢查常题/安裝是否 檢查常题/安裝是否 於觀確認已固裝差 外觀確認已固裝差 外觀確認已固裝差 外觀確認已固裝差 外觀確認已固裝差 外觀確認已固裝差 外觀確認已固裝差 外觀確認已固裝差 所觀確認已固裝差 所觀確認已固裝差 所觀確認已開業 確認現於不動量 確認現於系類數,沿室 定確的容析 意見所 而 和 相 行模式是否正確 是 行言或淨空 準備	<ul> <li>無異常</li> <li>変沈電歴: 26-01</li> <li>安雷</li> <li>警告</li> <li>安省</li> <li>警告</li> <li>(1 HDO</li> <li>(1 HDO<td>999 5 999 5</td><td></td><td></td><td></td><td>2.6 24 24.35 23.71 23.25 22.63 22.22 21.91 21.54</td><td><ul> <li>.08</li> <li>.8°</li> <li>28.6</li> <li>28.6</li> <li>28.7</li> <li>29.3</li> <li>29.4</li> <li>30.3</li> <li>30.5</li> <li>30.5</li> <li>30.5</li> <li>30.4</li> <li>.54</li> </ul></td><td>演就: (VDC) (VDC) 発行距離 (VDC) (VDC)</td><td>款線 飛行高度 平均油門 飛行時間(min) 總元行時間(min)</td><td>5- 135 CE(Y)</td><td>/ <sup>•</sup>~ / <sup>•</sup>流(A)</td><td>(mi</td></li></ul>	999 5 999 5				2.6 24 24.35 23.71 23.25 22.63 22.22 21.91 21.54	<ul> <li>.08</li> <li>.8°</li> <li>28.6</li> <li>28.6</li> <li>28.7</li> <li>29.3</li> <li>29.4</li> <li>30.3</li> <li>30.5</li> <li>30.5</li> <li>30.5</li> <li>30.4</li> <li>.54</li> </ul>	演就: (VDC) (VDC) 発行距離 (VDC) (VDC)	款線 飛行高度 平均油門 飛行時間(min) 總元行時間(min)	5- 135 CE(Y)	/ <sup>•</sup> ~ / <sup>•</sup> 流(A)	(mi
	到載	磁力封校正 確認安裝方向 外觀碟認有魚見損 增認固定螺熱頻繁 检查宽壓 检查完整 检查完整 检查多聚 检查多聚 检查多聚 检查多聚 检查多聚 检查多聚 检查多聚 检查多聚	<ul> <li>無異常</li> <li>重池電壁: 26-07</li> <li>変素書</li> <li>警</li> <li>警</li> <li>電磁査</li> <li>通販品質: ( 現表: 1( HDC 位是否正確</li> <li>起発</li> </ul>	999 <u>s</u> 999 <u>s</u>			<u> 起境前電展</u> <u></u> <u></u> <u></u> <u></u> <u></u> <u></u> <u></u> <u></u> <u></u> <u></u>	24 24 24 24 23-71 23-25 22-63 22-25 22-63 22-22 21-91 21-65 21-54 21-54	28.6 28.7 29.4 30.7 30.3 30.5 30.5 30.5	测试; (YDC) (YDC) 余行距離 (YDC) (YDC)	款款 飛行高度 平均油門 飛行時間(min) 總飛行時間 總飛行時間 // 進盛兵行時間	5- 135 ***(1)	/ ~ / ©~ / © ~ /	(m

## 4.9 橋下無 GNSS 之定位導航測試成果

#### 4.9.1 GRVINS 緊偶合融合演算法測試

這次測試實驗選擇的場地在臺南市善化區目加溜灣大道陸橋下(圖 4.29),使用的載具為TD-FUSION-450 (圖 4.30),上頭搭載的電腦為 Intel NUC,GNSS 接收器為 U-blox ZED-F9P,相機 為 Intel RealSense D455, IMU 為 Pixhawk Orange Cube 內建的 ICM20649,以及 UWB 基站及 接收器。其中 ZED-F9P 是一個支援多星系的低成本多頻段接收器,且具有解算 RTK 的功能, 在訊號好的空曠區域提供公分級的誤差精度。



圖 4.29 實驗測試地點環境照



圖 4.30 實驗設備及所搭載之無 GNSS 定位模組

本次實驗的路徑穿越橋梁下方,在同一次飛行作業中可產生有 GNSS 及無 GNSS 的訊號的 情況,可以用來測試融合演算法在有無 GNSS 的運算能量。另外儲存這兩筆路徑資料的時間為 傍晚,因此光線較為昏暗,會影響視覺特徵點的偵測、比對,以凸顯各類感測器融合能產生更 穩定的結果。以下有兩個實驗路徑,兩者在開始前會先在有 GNSS 訊號的區域繞行(如圖 4.31), 以蒐集足夠的資料使得 VIO 的局部坐標能夠與 GNSS 的經緯度坐標對齊。對齊坐標後,第1 個路徑為穿越橋梁下方,繞行同一矩形 3 圈 (如圖 4.31 橘色實線);第2 個路徑則是在橋梁 下來回折返兩次並繞圈,且重複 2 圈 (如圖 4.31 綠色虛線)。UWB 基站架設的位置如圖 4.31 中紅色標的 (0:23.119090,120.302799;1:23.119423,120.302918;2:23.119399,120.302760; 3:23.119095,120.302958)。



圖 4.31 實驗測試路徑圖

以下實驗將會分成 VIO、VIO+GPS、VIO+GPS+UWB 共 3 種融合情況來比較,由於在橋 梁下會缺乏 GNSS 訊號,無法使用 RTK Fixed 的資料當作真實值(Ground Truth),因此本實 驗將不以誤差來表示效能,而是將圖形畫出,比較各圈的差距,並以 4 個 UWB 基站為依據, 來比較相對位置。

1. VIO 融合成果(圖 4.32):

VIO 累積誤差大,兩個路徑的結果可以發現,各圈間的路徑不重合。並且從路徑1的結果 可見有越來越往右下偏,這便是累計誤差的結果。



圖 4.32 VIO 融合結果(圖左路徑 1,圖右路徑 2)

2. VIO+GPS 融合成果(圖 4.33):

VIO+GPS 的結果較 VIO 的累積誤差小,因為在橋外面時,有接收到 GNSS 的訊號,所以 可以修正一些誤差,但由於橋下大部分時間是缺乏 GNSS 訊號的,因此誤差就會如同 VIO 一樣。



圖 4.33 VIO+GPS 融合結果(圖左路徑 1,圖右路徑 2)

3. VIO+GPS+UWB 融合成果(圖 4.34):

VIO+GPS+UWB 顯示兩個路徑在各圈的路徑是幾乎重合的,如同 VIO+GPS 在有 GNSS 訊號時能夠修正 VIO 的誤差,UWB 的感測值可以彌補 GNSS 資料缺乏時提供全局一致性的資料來修正 VIO 的累積誤差。



圖 4.35 則是將上述 3 個方法(VIO, VIO+GPS, VIO+GPS+UWB)的結果疊在一起進行比較, 可以將 VIO+GPS+UWB 的結果當作真實路徑參考,便可看出 VIO 及 VIO+GPS 兩個結果的誤 差是相當大的。

將 VIO+GPS+UWB 融合的經緯度結果套畫在 Google Map 衛星影像上(圖 4.36,圖 4.37), 即可清楚看到測試時無人機所經過的路線,右上角為當下看到的影像以及特徵擷取、比對的結 果,右下角為當下的 ENU 及經緯度坐標,以及所收到的 UWB 基站訊號強度。



圖 4.35 VIO、VIO+GPS、VIO+GPS+UWB 融合結果比較(圖左路徑 1,圖右路徑 2)



圖 4.36 路徑 1 畫於 google map 地圖上 (VIO+GPS+UWB)



圖 4.37 路徑 2 畫於 google map 地圖上 (VIO+GPS+UWB)

1. UWB 基站個數

基於 UWB 收訊強弱會受其與基站距離及環境中的障礙物影響,在以 TD-FUSION-450 (圖 4.30)測試過程中也比較使用不同 UWB 基站數量的融合結果。如圖 4.38 中橘色線與藍色 線,有使用一個基站 (0 號)時就已經有一定的效果,但在與基站距離近的左側由於路徑 與幾何限制,使得效果較差,另外在基站對面的訊號較差,因此可見在上方的路徑也與 VIO+ GPS 相近。在 XY 平面中,兩個基站以上的效果相近,都能很好的修正累計誤差, 但 Z 軸的資料顯示,在使用 4 個基站時有更好的結果。通過這個實驗測試,可以知道在距 離更遠或其他可能干擾 UWB 訊號的情況,此算法仍然可以有一定的修正能力。綜上而言, 3 個基站將可取得良好的 XY 平面定位成果,4 個基站將提供較佳的 Z 軸定位資訊,亦即 在有效範圍內佈建 4 個基站將是最佳選擇。



圖 4.38 UWB 基站架設數量對融合定位之影響

2. UWB 訊號範圍測試

在 GNSS 訊號不佳的地方(如橋下、室內),UWB 是協助定位的感測器之一。對於動輒幾 十、幾百甚至上千公尺之橋梁,要能確保在每一跨距範圍內之 GRVINS 融合演算法推算出 來的定位之準確度,即使 UWB 原廠技術規格中宣稱其訊號範圍為 500 公尺,實際作業上 仍需要對於 UWB 訊號有效範圍進行測試。

測試機型為 TD-Q-650 (圖 4.30),測試場域為 GPS 訊號收訊良好之亞洲無人機 AI 創新應 用研發中心測試場域。將4個 UWB 基站分別至於不同大小範圍之矩形4個角落,飛行測 試時是由無人機操作員控制無人機在事先設定之測試範圍內到處飛行,並記錄距離數據、 RSSI 數值、RSSI 介於 0~6 之間的比例(表 4-26),以評估 20 m x 50 m 至 20 m x 100 m 距離 之收訊狀況。

此實驗環境為一空曠場地,可假設場域當中可能影響訊號收訊的因素是可以忽略的,因此 實際在橋梁下使用時可能會使有效距離縮短。由於 GRVINS 的算法中,UWB 的資料只使 用 RSSI 的數值介於 0 ~ 6 之間的數值,所以穩定度的指標加入了 RSSI 數值介於 0 ~ 6 之 間的比例。當基站架設之間的距離為 20 x 50 ~ 20 x 90 (m x m)時,數值都相當的穩定,但 可用的比例有些微下降,而於 20 x 100 (m x m)時,表中的紅色框與紫色框,UWB 0 與 UWB 3 的數值不穩定,容易影響算法的結果。因此建議 UWB 基站之間的距離不要超過 90 公 尺。

測試範圍 (m x m)	測試結果	RSSI 介於 0~6 之間 的比例
20 x 50	N         N           N         N	•UWB 0 : 0.9827 •UWB 1 : 0.9810 •UWB 2 : 0.9686 •UWB 3 : 0.9520 •結論 : 數值穩定

表 4-26 UWB 訊號有效範圍測:	試(TD-Q-650)
---------------------	-------------





#### 4.9.3 GRVINS 之定位精度及穩定度測試

1. 定位精度測試

測試機型為 TD-Q-650 及 TD-Y6B-1200 (圖 4.30),測試場域為 GPS 訊號收訊良好之亞洲無 人機 AI 創新應用研發中心測試場域。將4 個 UWB 基站置於約 20 m x 50 m 矩形的4 個角 落,並由無人機操作員事先規劃3種航線,實際飛行測試時讓無人機以 GRVINS 融合演算 出來的定位進行自主飛行。此實驗環境為一空曠場地,可假設場域當中可能影響訊號收訊 的因素是可以忽略的,為模擬橋下無 GNSS 的作業環境,在進行 GRVINS 融合演算時只使 用視覺、IMU 及 UWB 進行融合演算,同時將 RTK 數值視為真實值進行 GRVINS 估計結 果的誤差計算(表 4-27)。在使用視覺+IMU+UWB 的算法中,可看出大部分時間與 RTK 的 差距在 20 cm 以內,考慮到 RTK 也是有些許誤差的,因此認定本算法是足以提供高精度 的定位結果給無人機於無 GPS 環境中使用。



#### 表 4-27 GRVINS 定位精度測試(TD-Q-650)

2. 穩定度測試

測試機型為 TD-Q-650 (圖 4.30),測試場域為台 61 線近布袋港之橋下(圖 4.24,圖 4.39), 在橋下之 GPS 訊號收訊差(圖 4.40)。將4 個 UWB 基站置於橋梁外側形成一個矩形(圖 4.40), 由無人機操作員事先規劃飛行航線由東北方向西南方來回前行 10 m 並 5 趟後降落,透過 捲尺計算與起飛點的距離。量測方式是以無人機左前腳為量測點,測量起始點及抵達降落 點的位置是否相距 10 m,實際量測長度為 10.1 m。





(a)测試場域

(b)誤差量測





(a)預計飛行路徑
 (b)實際飛行路徑
 圖 4.40 台 61 橋下之 GRVINS (橘線)定位與 GPS(綠線)的結果

### 4.9.4 橋檢無人機 TD-Y6B-1200 與 GRVINS 模組整合

1. TD100-Y6B1200 與 GRVINS 模組整合之視覺校正

於 TD-Q-650 上測試完成 GRVINS 演算法的準確度及穩定度後,將此設備移植到 TD-Y6B-1200 無人機(圖 4.41)上進行後續測試。移植後須先對相機內參數以及相機及 IMU 的外部 參數進行校正,使用的是 Aprilgrid 校正板以及 Kalibr 校正軟體進行校正,並將無人機的 定位相機面向 AprilGrid 進行三軸的旋轉、平移,最後隨意移動,另兩個相機的重投影誤差 皆在 2 像素內,靠近 0 (圖 4.42),可知校正結果良好。



圖 4.41 TD-Y6B-1200 與 GRVINS 模組整合及視覺校正

 T\_ic:
 (cam1 to imu0):

 [[-0.01445992 -0.02176204 0.9996586 0.2837621 ]

 [-0.99981366 0.01310202 -0.01417694 -0.076316 ]

 [-0.01278903 -0.99967732 -0.02194744 0.11541617]

 [0. 0. 0. 1. ]]



(b)左右相機對於校正版上的標記之重投影誤差 圖 4.42 TD-Y6B-1200 與 GRVINS 模組融合後之視覺校正結果

2. VIO (視覺+IMU)測試結果

利用校正完成之參數進行相機+IMU的 VIO 算法測試,定位結果穩定,顯示 TD-Y6B-1200 與 GRVINS 模組整合及校正結果皆良好(如圖 4.43)。



(a) VIO 測試



(b)定位結果穩定 圖 4.43 VIO (視覺+IMU)測試結果

3. 定位精測試

測試機型為 TD-Y6B-1200 (圖 4.41),測試場域為 GPS 訊號收訊良好之亞洲無人機 AI 創新 應用研發中心測試場域。將4個 UWB 基站置於約20m x70m 矩形的4個角落,並由無 人機操作員事先規劃15m x50m 矩形航線,分別繞圈2次及1次進行UWB 訊號範圍測 試(表 4-28)及定位精度測試(表 4-29)。實際飛行測試時讓無人機以 GRVINS 融合演算出來 的定位進行自主飛行。此實驗環境為一空曠場地,可假設場域當中可能影響訊號收訊的因 素是可以忽略的。

雖然之前曾以 TD-Q-650 進行 UWB 訊號範圍測試(表 4-26),已知 20 m x 90 m 是訊號穩定 範圍,但將 GRVINS 模組設置 TD-Y6B-1200 上時,不確定機構設計及不同的硬體設置位 置是否影響 UWB 信號穩定度,因此做此測試。此次測試僅先進行架設範圍 20×70 (m) 的 結果分析,目前測試結果確定現行 TD-Y6B-1200 與 GRVINS 模組整合方式在 20 m x 70 m 的情況下,UWB 訊號數值穩定(表 4-28)。



#### 表 4-28 UWB 訊號範圍測試(TD-Y6B-1200)

為模擬橋下無 GNSS 的作業環境,在進行 GRVINS 融合演算時只使用視覺、IMU 及 UWB 進行融合演算,同時將 RTK 數值視為真實值進行 GRVINS 估計結果的誤差計算。本研究 於 111 年 10 月 26 日實驗時,因不明原因導致 RTK 不收斂。測試所得誤差為 GRVINS 融 合演算估計數值與隨時在飄移且本身誤差高達公尺等級之 GPS 結果進行比較(表 4-29),因 Ground Truth 本身即為高誤差數值,此結果僅能做為參考,不能作為算法精準度依據。本 次測試雖然無法估算精度,但仍顯示將 GRVINS 定位系統移植至 TD-Y6B-1200 後,無人 機可穩定飛行。111 年 11 月 8 日另作測試以取得定位精度分析,在第 1 次進行長方形繞 2 圈時,RTK 收斂良好(表 4-29),在第 2 次進行繞行之字形一圈後返回原點,又發生 RTK 有 一段路程無法收斂(表 4-29),因為需要正確的 RTK 數值作為 Ground Truth,故以 RTK 收 斂良好時進行精度分析。



# 表 4-29 GRVINS 定位精度測試(TD-Y6B-1200)



4. UWB 測試

在以現有 UWB 進行緊耦合最佳化算法 GRVINS 測試確認該演算法軟體架構及定位效能後,本研究將持續測試其他品牌 UWB 是否可行,預計將測試的品牌包括比利時的 Pozyx UWB 以及台大電機系毛紹剛教授與工研院合作開發之 iWavenology iPosition UWB 系統 (表 4-30)。

## 表 4-30 Pozyx UWB 與毛紹剛教授的 UWB 比較表

品牌	Pozyx UWB <b>POZYX</b> <sup>®</sup> <b>OZYX</b> <sup>®</sup> <b>OZYX</b> <sup>®</sup>	
產地	比利時	臺灣(台大電機系毛紹剛教授與工研院合作開發 之 UWB)
誤差	官網表示 10 cm	官網表示 <20 cm
範圍	400~800 m <sup>2</sup> ,約 20~30 m	官網表示約 600 m
官網	https://store.pozyx.io/shop/50-	https://www.iwavenology.com/product/iposition
	003-0001-creator-one-g1-360#attr	
參考	https://github.com/pozyxLabs	
開源		
碼		

針對 Nooploop 簡版 UWB 及 Pozyx UWB(圖 4.44),將 UWB 基站架設於長邊 10、20、30 公尺的位置,並在範圍內繞行 3 圈,收集 RTK 數值作為參考。從測試結果得知,這 2 種 UWB 的訊號有效範圍街只有 20 公尺左右,不足以用於橋梁下方之定位使用,爰建議再尋 找更多其他 UWB 進行更多的測試。



圖 4.44 Nooploop 簡版 UWB 及 Pozyx UWB 訊號範圍測試環境



表 4-31 Nooploop 簡版 UWB 及 Pozyx UWB 訊號範圍測試結果比較表



#### 4.10 無人機測試場域之建置

有鑒於無人機整合後需要一個橋面寬廣以便遮擋 GNSS 訊號,且橋下有寬廣空間,例如橋 梁高度超過6公尺以便無人機飛行測試,且橋外側有緩衝區可讓無人機飛行而不會影響交通。 因此,本研究選擇嘉義縣布袋港附近台61高架橋下,也就是第三漁港聯絡道與後寮路之間當 作未來無人機橋下飛行之測試區,其寬度為4線道(~22m),橋梁結構包括 I 型梁(2 跨 x39.7m) 與箱型梁(0.3 跨 40m),共有3 個橋墩(P4-P6),總長 120 公尺。為了後續測試橋下無 GNSS 訊 號時之自動定位導航精準度與穩定度,首先要建置此橋梁環境之仿真三維模型與物件化三維模 型。

首先本研究於 111 年 8 月 23、30 日,分別利用無人機與手持相機方式拍攝低解析影像, 同時以國土測繪中心 VBS-RTK 完成 8 個地面控制測量之施測(圖 4.45)。無人機型號為 Autel Robotics EVO II Pro 6K, FOV64 度,影像大小 5472x3658,像素大小 2.4µm,焦距 10.57 mm, 共拍攝 747 張,其拍攝目標主要為橋梁路面、護欄、兩側大梁與橋梁附近環境,包括植被、交 通標誌與電線干等,以便協助無人機航線規劃時能避開這些障礙物。此外本研究同時於地面上 以手持相機方式,由下往上拍攝大梁、橫隔梁與橋面板下方,包括大梁與橫隔梁側邊,採用的 相機是 Sony A7r2,鏡頭焦距 24 mm,FOV 約 73 度,共拍攝 1896 張照片。

接著本研究將所有照片與地面控制點坐標, 匯入 Metashape 以 SfM 技術解算所有照片之外 方位參數,包括相機自率。所有照片之分佈如圖 4.46 所示,其中藍色為無人機拍攝之影像,粉 紅色為地面攝影,整體而言這些照片是以包覆式拍攝整座橋梁。特別注意的是本座橋共有9支 大梁,所以極容易造成遮蔽現象,因此在地面攝影時拍攝了相當多照片,經空三平差誤差分析 後,得到控制點與檢核點之三軸(XYZ)誤差分別約 7.4cm 與 9.6cm。

接著本研究以密集影像匹配技術,產生橋梁表面密集點雲,成果如圖 4.47~圖 4.51 所示, 由這些圖可以發現即使是兩支大梁間的狹小空間,亦有產生完整的三維密集點雲。如此一來即 可製作圖 4.52 與圖 4.53 之三維網格模型,以及圖 4.54 之仿真三維模型,此模型中隱約可見橋 梁附近之房屋、交通標誌與電線干等,由於這些區域是以無人機拍攝,其拍攝距離較遠,導致

155

空間解析度與點雲密度不足,尤其是電線干之類的線狀物體,很難製作出完整的幾何模型,但仍足以協助後續規劃無人機飛行航線,用以避開這些障礙物。



圖 4.45 地面控制點分佈與施測情況



圖 4.46 經空三平差後照片之分佈(藍色:UAV,粉紅色:地面攝影)



圖 4.47 全橋密集點雲側視圖



圖 4.48 S5 之密集點雲



圖 4.49 S6 之密集點雲



# 圖 4.50 S7之密集點雲(0.3 跨箱型梁)



# 圖 4.51 局部放大 I 型梁密集點雲



圖 4.52 三維網格模型(S6)



圖 4.53 三維網格模型(S7)



圖 4.54 橋梁仿真三維模型

本研究最後將密集點雲匯入 SketchUp 軟體(圖 4.55),以人工數化橋梁表面之 CAD 模型(圖 4.56),將屬於同一構件之多邊形,選取設定其構件編號。因此在 Blender 軟體中,點選任一構件,即可顯示其構件編號(圖 4.57),接著本研究即可使用 Blender 軟體進行半自動航線規劃。



圖 4.55 以 SketchUp 數化物件化橋梁三維模型(含密集點雲)



圖 4.56 以 SketchUp 數化物件化橋梁三維模型(不含密集點雲)



圖 4.57 以 Blender 顯示物件化橋梁三維模型之構件編號
## 第五章 結論與建議

本研究為兩年期(111~112年)研究計畫,在111年已有初步具體成果,已開發橋梁AI影像 辨識模式,利用AI技術辨識橋梁構件劣化類型,並判別劣化程度。目前開發之橋梁AI影像辨 識模式,已可辨識橋梁六大主要構件(1.主梁,2.橫隔梁,3.橋墩/帽梁,4.橋面板,5.橋台,6.翼 牆/擋土牆)之三大劣化缺失(1.混凝土結構裂縫,2.混凝土剝落、破碎、鋼筋外露、銹蝕,3.滲水、 白華損傷),112年將結合無人機技術,利用無人機機動性、即時性及便利性等特點,快速拍攝 橋梁影像並利用AI影像辨識橋梁構件劣化狀況,以增進橋梁檢測品質與效率,可協助橋梁主 管機關橋梁檢測相關業務之推動。

#### 5.1 結論

- 在利用車行橋梁管理資訊系統中之列化照片進行資料庫資料清洗部分,本研究共選取 4,262張照片,進行各式劣化類型之人工標註工作,同時完成DRU值的人工編輯與確認, 其中 3,304張的DRU值有編輯過,變更比例達 77.48%。另外精度驗證部分,14座橋梁資 料共清洗 4,805筆,清洗完成剩 833筆資料。
- 本研究所發展的深度學習模型 DeepLab v3++與 DRU 推估模型的驗證與測試結果說明深度 學習方法使用於橋梁影像自動檢測具有可行性, 裂縫、剝落、銹蝕、白華、滲水的漏授/誤 授 誤 差 (OE/CE) 分 別 為 36.36/46.09%、11.30/17.43%、17.96/25.56%、16.11/21.93%、 12.39/17.82%, 比 DeepLab V3+降低了 14-32%。
- 3. 在14座橋梁影像劣化區域辨識與DRU推估模型測試結果,從劣化區域辨識視覺結果可看 到AI模型可穩定且正確地判識劣化位置,忽略影像各式非劣化雜物與背景,AI模型橋梁 影像劣化辨識能力應可與橋檢專業人員匹配,而DRU模型1-3的14座橋梁測試資料MAE 分別為0.313、0.431、0.331。整體而言,DRU推估深度學習模型方面可行,但需解決影像 空間尺度不一與模型過度擬合問題,影像空間尺度不一可使用攝影測量與具有高定位精度 UAV 解決,模型過度擬合則需要大幅增加訓練資料集數量與多樣性。
- 4. 目前市面上沒有現成完全符合需求之商用橋梁巡檢無人機,因此本研究規劃設計之橋梁檢 測專用無人機,考慮到酬載能力、能源效率以及各種拍攝方向之巡檢需求等,以Y6(三軸 六獎)多旋翼構型設計兩種軸距(850 mm 及 1200 mm)的多旋翼無人機,最大酬載能力為5 kg,最大起飛重量小於15 kg 之 Y6 多旋翼無人機,抗風能力可達5級。同時考慮到無人 機橋梁巡檢的飛行環境複雜度,本橋梁巡檢無人機將搭載水平360度以及上下方單線式的 防撞 LiDAR,確保無人機在飛行過程中,與橋梁及周邊障礙物保持安全距離,避免發生擦

163

撞、損傷;此外 Y6 多旋翼的特殊構形可以將巡檢用的相機掛載於機身前緣,搭配自製相 機雲台來控制相機拍攝下方、前方及上方等方位的橋梁構件,並於雲台下方搭載可程式控 制之高亮度 LED 補光照明設備,用於拍攝橋下光源不足之情境使用。

5. 透過飛手以手控無人機飛行,以及以手持方式記錄移動數據,進行有無 GNSS 訊號的環境 定位實驗,成果說明本研究所提出的演算法可以在有無 GNSS 訊號的環境中無縫接軌,提 供無人機全局一致性的絕對定位結果,並且能在 GNSS 訊號很差或是完全缺乏 GNSS 訊號 的區域,提供合理準確的經緯度的坐標。此外本研究所提出之演算法不需要提前掃描環境 或設定 GNSS 原點,演算法會主動將 VIO 的定位結果對齊至經緯度絕對地理坐標,並且透 遇 GNSS 及 UWB 的訊號來補償視覺感測器在低紋理、低光度等環境會使視覺感測失敗所 導致的誤差,以及修正 VIO 容易形成的累計誤差,並保持了 VIO 的局部定位精度。初步 測試絕對定位精度可達 20 公分,可满足橋梁下之定位導航與拍攝高解析影像之定位精度 需求。

#### 5.2 建議

- 1. 由於橋檢影像現場拍攝的狀態相當多樣,例如影像拍攝角度、遠近、明亮不同,影像上看 似某劣化特徵,但事實上不是劣化,例如工作縫被誤判為裂縫、偏白色之混凝土看似白華, 此外還有 DRU 評等標準不一致問題、訓練資料數量與多樣性不足,這些都造成深度學習 模型訓練的困難。目前裂縫劣化類別的辨識結果(R=63.64%; P=53.91%)仍有改進空間,在 成果中可看到預測結果仍有漏授部分,不明顯的裂縫未能被模型檢測出來,後續未來模型 能偵測到細微裂縫,同時也壓低誤判的發生。由這幾次的實驗可發現,Focal Loss 可有效 抑制預測影像中的雜訊,也就是誤判的部分,因此本研究建議後續將 Cross Entropy 與 Focal Loss 做結合,並且調整權重和參數,以達到更佳的預測成果,另外也會測試其他的損失函 式或使用自訂函式。
- 2. 本研究後續將持續在台 61 線近布袋港橋下進行橋下測試,同時也將再找其他更寬廣且無樹木影響飛行的橋梁下實驗環境,降低測試時進行交通管控之程度,以測試該演算法在橋下實做時的穩定度與絕對定位精度,並將融合的定位結果傳入飛控系統中,測試無人機透過事先在地面控制站規劃好的航線進行自主飛行的穩定度與定位精度測試。建議未來導入Blender 事先針對測試橋梁 3D 模型規劃好之航線,進行橋檢空拍作業測試,一方面評估無人機飛行精度,一方面測試 Blender 航線規劃及拍照資訊寫入照片 EXIF 之設定。

164

### 参考文獻

- 王炤烈,2018."特輯引言:義大利 Morandi 橋崩塌帶來的省思",DOI: 10.6653/MoCICHE.201810\_45(5).0001,土木水利,45 卷 5 期 (20181001),pp. 4
- 2. 彭康瑜,林曜滄,宋裕祺,洪曉慧,蘇進國,吴明遠,2018."Morandi 橋崩塌事件分析報導",DOI: 10.6653/MoCICHE.201810\_45(5).0002,土木水利,45 卷 5 期 (20181001),pp. 5-21
- 3. 交通部, 2012 年「公路養護規範」, https://gpi.culture.tw/books/1010100293。
- 交通部運輸研究所,2018年「我國橋梁檢測方式之發展探究」, https://www.iot.gov.tw/cp-78-12237-410ea-1.html。
- 交通部,2018.交通技術標準規範公路類公路工程部-公路橋梁檢測及補強規範,2018年10月。

https://www.motc.gov.tw/ch/home.jsp?id=740&parentpath=0%2C2%2C738&mcustomize=divp ubreg\_view.jsp&dataserno=425&aplistdn=ou=data,ou=divpubreg,ou=ap\_root,o=motc,c=tw&to olsflag=Y&imgfolder=img%2Fstandard °

- 交通部,2020.交通技術標準規範公路類公路工程部-公路橋梁檢測及補強規範,2020年1月。
- 7. 交通部, 2011.「橋梁目視檢測評估手冊(草案)」 之研擬, 2011 年 10 月。
- 8. 蔡欣局, 2021年.劣化評等案例說明及演練, 中華顧問工程司, 2021年101月。
- 6. 薛強,張權,翁健煌,徐偉誌,陳正忠,葉啟章,2012,臺灣橋梁檢測有效實施建議,中興工程,第 117 期,PP. 31-40
- 10. 日本國土交通省,2015.下一代社會基礎設施機器人的開發和引進
- 11. 小沼惠太郎, 2015.由多視點圖像三維施工技術土木結構的研究, 太平洋顧問有限公司
- 12. 曾子峻, 2011, "多軸飛行器於橋梁檢測之應用研究", 國立高雄應用科技大學, 土木工程與 防災科技研究所,碩士論文,107頁。
- 13. 姚乃嘉, 2013,"三維橋梁目視檢測輔助系統之研究"國立中央大學營建管理研究所. 科技部計畫報告。
- 14. 姚乃嘉,蔡閔光,黃榮堯,2015,第二代臺灣地區橋梁管理資訊系統建置規劃,國立中央大學 營建管理研究所.交通部運輸研究所計畫報告。
- 15. 姚乃嘉, 2015,"建立行動裝置 3D 橋梁檢測應用程式之研究"國立中央大學營建管理研究 所. 科技部計畫報告。
- 16. 連冠婷, 2018."以全卷積網路結合物件導向影像分類進行橋梁裂縫偵測",國立成功大學,測量及空間資訊學系,碩士論文,77頁。
- 17. A. I. Mourikis and S. I. Roumeliotis, "A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Rome, Italy, Apr. 10–14, 2007, pp. 3565–3572.
- Badrinarayanan, V., Kendall, A., Cipolla, R., 2017. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell 39, 2481-2495.
- 19. C. Campos, R. Elvira, J. J. G. Rodríguez, J. M. Montiel, and J. D. Tardós, "ORB-SLAM3: An

accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap SLAM," in *IEEE Trans. Robot.*, vol. 37, no. 6, pp. 1874–1890, Dec. 2021.

- 20. C. Forster, L. Carlone, F. Dellaert, and D. Scaramuzza, "On-manifold preintegration for real-time visual-inertial odometry," in *IEEE Trans. Robot.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–21, Feb. 2017.
- 21. C. Forster, M. Pizzoli, and D. Scaramuzza, "SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Hong Kong, May 2014, pp. 15–22.
- 22. C. Forster, Z. Zhang, M. Gassner, M. Werlberger, and D. Scaramuzza, "SVO: Semidirect visual odometry for monocular and multicamera systems," in *IEEE Trans. Robot.*, vol. 33, no. 2, pp. 249–265, 2017
- Cha, Y.J., Choi, W., Büyüköztürk, O., 2017. Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 32, 361-378.
- 24. Chen, L.C., Papandreou, G., Schroff, F., Adam, H., 2017. Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation. arXiv preprint arXiv:1706.05587.
- Chen, L. C., Papandreou, G., Kokkinos, I., Murphy, K., & Yuille, A. L. ,2017. Deeplab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected crfs. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 40(4), 834-848
- 26. Chen, L.C., Zhu, Y., Papandreou, G., Schroff, F., Adam, H., 2018. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation, Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV), pp. 801-818.
- Dong, Y., Wang, J., Wang, Z., Zhang, X., Gao, Y., Sui, Q., Jiang, P., 2019. A Deep-Learning-Based Multiple Defect Detection Method for Tunnel Lining Damages. IEEE Access 7, 182643-182657.
- 28. Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. 2021, An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale, *The International Conference on Learning Representations (ICLR).*
- 29. Feurer, M., & Hutter, F. (2019). Hyperparameter optimization. In Automated machine learning (pp. 3-33). Springer, Cham.
- 30. H. Xu, Y. Zhang, B. Zhou, L. Wang, X. Yao, G. Meng and S. Shen, 2021, "Omni-swarm: A Decentralized Omnidirectional Visual-Inertial-UWB State Estimation System for Aerial Swarm," in *arXiv*, *arXiv*:2103.04131.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J., 2016. Deep residual learning for image recognition, Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 770-778.
- 32. Hinton, G.E., Osindero, S., Teh, Y.W., 2006. A fast-learning algorithm for deep belief nets. Neural computation 18, 1527-1554.
- 33. J. Li, Y. Bi, K. Li, K. Wang, F. Lin, and B. M. Chen, "Accurate 3d localization for MAV swarms by UWB and IMU fusion," in *Proc. 14th IEEE Int. Conf. Control Autom.*, 2018, pp. 100–105.

- 34. J. Rehder, J. Nikolic, T. Schneider, T. Hinzmann, and R. Siegwart. "Extending kalibr: Calibrating the extrinsics of multiple IMUs and of individual axes," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. May 2016, pp. 4304–4311.
- 35. K. Wu, A. Ahmed, G. A. Georgiou, and S. I. Roumeliotis, "A square root inverse filter for efficient vision-aided inertial navigation on mobile devices," in *Proc. Robot.*, Sci. Syst., vol. 2, 2015.
- Kim, I.H., Jeon, H., Baek, S.C., Hong, W.H., Jung, H.J., 2018. Application of Crack Identification Techniques for an Aging Concrete Bridge Inspection Using an Unmanned Aerial Vehicle. Sensors (Basel) 18.
- 37. König, J., Jenkins, M. D., Mannion, M., Barrie, P., & Morison, G. (2021). Optimized deep encoder-decoder methods for crack segmentation. *Digital Signal Processing*, *108*, 102907.
- Kruachottikul, P., Cooharojananone, N., Phanomchoeng, G., Chavarnakul, T., Kovitanggoon, K., Trakulwaranont, D., Atchariyachanvanich, K., 2019. Bridge Sub Structure Defect Inspection Assistance by using Deep Learning, 2019 IEEE 10th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST). IEEE, pp. 1-6.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J., 2016. Deep residual learning for image recognition. *In* Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2016), pp. 770-778.
- 40. LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G., 2015. Deep learning. Nature 521, 436-444.
- 41. Li, K., Wang, B., Tian, Y., & Qi, Z. (2021). Fast and accurate road crack detection based on adaptive cost-sensitive loss function. *IEEE Transactions on Cybernetics*.
- Lin, T. Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., & Dollár, P. (2017). Focal loss for dense object detection. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* (pp. 2980-2988).
- 43. Liu, W., Wang, Z., Liu, X., Zeng, N., Liu, Y., Alsaadi, F.E., 2017. A survey of deep neural network architectures and their applications. Neurocomputing 234, 11-26.
- M. Bloesch, M. Burri, S. Omari, M. Hutter, and R. Siegwart, "Iterated extended Kalman filter based visual-inertial odometry using direct photometric feedback," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 36, no. 10, pp. 1053–1072, 2017.
- 45. M. K. Paul, K. Wu, J. A. Hesch, E. D. Nerurkar, and S. I. Roumeliotis, "A comparative analysis of tightly-coupled monocular, binocular, and stereo VINS," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Singapore, May 2017, pp. 165–172.
- 46. Matija Radovic, Offei Adarkwa, & Qiaosong Wang, 2015. "Civil Data Analytics performed bridge inspections using Unmanned Aerial Vehicles and Image Reconstruction", The 11th Annual Inter-University Symposium for Infrastructure Management (AISIM11).
- 47. N. Brunetto, S. Salti, N. Fioraio, T. Cavallari, and L. Stefano. "Fusion of inertial and visual measurements for rgb-d slam on mobile devices," in *IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, pages 1–9, 2015.
- 48. Narazaki, Y., Hoskere, V., Hoang, T.A., Spencer Jr, B.F., 2018. Automated vision-based bridge

component extraction using multiscale convolutional neural networks. arXiv preprint arXiv:1805.06042.

- 49. Qu, Z., Cao, C., Liu, L., & Zhou, D. Y. ,2021. A deeply supervised convolutional neural network for pavement crack detection with multiscale feature fusion. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*.
- 50. S. Cao, X. Lu and S. Shen, "GVINS: Tightly Coupled GNSS–Visual–Inertial Fusion for Smooth and Consistent State Estimation," in *IEEE Transactions on Robotics*, 2021.
- S. Leutenegger, S. Lynen, M. Bosse, R. Siegwart, and P. Furgale, "Keyframe-based visual-inertial odometry using nonlinear optimization," *International Journal of Robotics Research*, vol. 34, no. 3, pp. 314–334, 2015.
- 52. S. Lynen, M. W. Achtelik, S. Weiss, M. Chli, and R. Siegwart, "A robust and modular multisensor fusion approach applied to mav navigation," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nov 2013, pp. 3923–3929.
- 53. S. Lynen, M. W. Achtelik, S. Weiss, M. Chli, and R. Siegwart, "A robust and modular multisensor fusion approach applied to mav navigation," in *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.* IEEE, 2013, pp. 3923–3929.
- S. Weiss, M. Achtelik, S. Lynen, M. Chli, and R. Siegwart, "Real-time onboard visual-inertial state estimation and self-calibration of MAVs in unknown environments," in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Paul, MN, May 14–18, 2012, pp. 957– 964.
- 55. Satoshi ANAI, Nobuyoshi Yabuki, Tomohiro Fukuda (2021). Precision Comparison of Deep Learning Models for Detecting Concrete Surface Deterioration Types from Digital Images, Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser F3 (Civil Engineering Informatics) 77(1):1-13, DOI:10.2208/jscejcei.77.1\_1
- Shule, W., Almansa, C., Queralta, J.P., Zou, Z., & Westerlund, T. ,2020. UWB-Based Localization for Multi-UAV Systems and Collaborative Heterogeneous Multi-Robot Systems: a Survey. ArXiv, abs/2004.08174.
- 57. Snoek, J., Larochelle, H., & Adams, R. P. ,2012. Practical bayesian optimization of machine learning algorithms. Advances in neural information processing systems, 25
- Song, W., Jia, G., Zhu, H., Jia, D., Gao, L., 2020. Automated Pavement Crack Damage Detection Using Deep Multiscale Convolutional Features. Journal of Advanced Transportation 2020.
- 59. Sun, Y., Yang, Y., Yao, G., Wei, F., & Wong, M. ,2021. Autonomous crack and bughole detection for concrete surface image based on deep learning. *IEEE Access*, *9*, 85709-85720.
- 60. T. Nguyen, S. Yuan, M. Cao, T. Nguyen and L. Xie, "VIRAL SLAM: Tightly coupled camera-IMU-UWB-LIDAR SLAM," in *arXiv*, May 2021.
- 61. T. Qin and S. Shen, "Robust initialization of monocular visual-inertial estimation on aerial robots," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, Vancouver, Canada, 2017, pp. 4225–4232

- 62. T. Qin, J. Pan, S. Cao, and S. Shen, "A general optimization-based framework for local odometry estimation with multiple sensors," in *arXiv*:1901.03638, 2019.
- 63. T. Qin, P. Li, and S. Shen, "VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 4, pp. 1004–1020, 2018.
- 64. T. Qin, S. Cao, J. Pan, and S. Shen, "A general optimization-based framework for global pose estimation with multiple sensors," in *arXiv e-prints*, 2019.
- 65. Tan, M., & Le, Q. ,2019. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In *International conference on machine learning* (pp. 6105-6114). PMLR.
- 66. W. Huang and H. Liu, "Online initialization and automatic camera-IMU extrinsic calibration for monocular visual-inertial SLAM," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2018, pp. 5182–5189.
- Xu, H., Su, X., Xu, H., Li, H., 2019. Autonomous Bridge Crack Detection Using Deep Convolutional Neural Networks, 3rd International Conference on Computer Engineering, Information Science & Application Technology (ICCIA 2019). Atlantis Press.
- 68. Yu, F., Koltun, V., & Funkhouser, T., 2017. Dilated residual networks. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2017)*, pp. 472-480.
- 69. Zhao, H., Shi, J., Qi, X., Wang, X., Jia, J., 2017. Pyramid scene parsing network, Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 2881-2890.
- Zou, Q., Zhang, Z., Li, Q., Qi, X., Wang, Q., & Wang, S. ,2018. Deepcrack: Learning hierarchical convolutional features for crack detection. *IEEE Transactions on Image Processing*, 28(3), 1498-1512.

# 附錄1: 期中報告審查會議審查意見處理情況表

交通部運輸研究所□合作研究計畫□委託研究計畫

### √期中□期末報告□會議□書面□複審

# 審查意見處理情形表

計畫名稱: 無人機搭配 AI 影像辨識應用於橋梁檢測之研究(1/2)-橋梁劣化構件 AI 影像辨識之技術開發

執行廠商:國立成功大學

審查 <u>委</u> 員/單位之意見	<u>執行廠商</u> 處理情形	本所 <u>各組及中</u> 心審查意見
一、黄其彦委員:		
由期中報告的資料看不出原先預定期	所有工作項目在報告 1.2 節中已全部列	同意辨理
中該完成之項目,有哪些項目超前或落	出,初略之工項也列入進度甘梯圖中,	
後,建議應有一個預定時程完成項目,	但沒有詳列所有細部的工項進度。至於	
以及實際執行情形的說明,例如:10 座	10 座橋梁的驗證是由運研所從資料庫	
橋梁的驗證及時程,以及挑選之原則。	中選定 10 座橋梁,並將其影像由資料	
	庫中匯出給本研究,本研究將先進行影	
	像清洗與 DRU 編輯後,再使用深度學	
	習模型進行預測 DRU 值,並評估模型	
	的準確度。因此這項工作是在計畫後	
	期,也就是等深度學習模型的訓練與驗	
	證工作之後,因為資料清洗與深度學習	
	模型的開發與測試有很多變數,敬請諒	
	解很難明確寫出明確的時間。	
每一個工作項目(資料清洗、深度學習、	由於本研究為 1+1 形式,也就是第一年	同意辨理
無人機)介紹得很詳細,但卻沒有整合所	研究成果經審查通過後才能繼續執行	
有項目做成系統性說明,各項目如何完	第二年計畫。本研究沒有預設第二年計	
成,以及現場的作業程序為何?例如:無	畫仍會由本研究執行,因此本期中報告	
人機只負責執行照相,或是無人機上會	僅針對第一年計畫目標與工作項目進	
搭載辨識模組可以一邊拍攝一邊辨識,	行說明,沒有詳細說明兩年的計畫預期	
還是現場需要1台 PC/NB 當後台處理	要達到的目標,後續於期末報告時會改	
辨識影像。	以兩年計畫之工項與目標進行說明。	
另外無人機飛行路線是一開始就設定	目前本研究規畫無人機只負責按照預	
完成,或是飛行途中遇到特定劣化構件	先規劃好的航線進行飛行與拍攝高解	
由手動調整航線,另遇到不明顯的劣化	析影像,而後將影像下載,先解算每張	
狀況時,鏡頭是否會自動調整等。	照片的拍攝位置與姿態,再應用深度學	
	習模型進行劣化類型之辨識與 DERU	
	之評定,包括將各式劣化類別向量資料	
	與橋梁構件 3D 模型套疊展示,製作橋	
	檢報告後,再上傳到台灣橋梁管理系	

	統。因此,預期目標是無人機採用一鍵
	起飛、自動返航與自動降落、自動飛行
	與拍照,過程中不會同時分析影像、不
	會人工介入操作、事先規劃好的航線與
	鏡頭拍攝方向,經過驗證沒問題之後,
	未來還可以重複使用。
二、黃維信委員:	
資料庫資料清洗的部分,有哪些資料是	本研究並非將資料庫中所有影像都用 同意辦理
清洗完且調整後可以用的,而資料誤差	於訓練 AI 模型,而是根據不同的 D 值
的原因是因為橋檢人員現場判別與其	挑選數量大致一樣的影像,且影像中的
拍攝的影像有所出入,或是因為檢測人	劣化類型必須人眼可判識,如此才能以
員判斷 DERU 上有一個彈性範圍而產	人工標註各式劣化類型,供深度模型模
生誤差,建議團隊補充說明。	型之訓練與驗證用。總計本研究於三個
	月時間內,以人工標註了四千多張影像
	供深度學習模型訓練與驗證。為了使
	DRU 的深度學習推估模型更穩定,不受
	不同廠商的現場橋檢人員評等因主觀
	判斷而造成誤差,本研究召集了多位橋
	檢專家與現場橋檢人員參與專家會議,
	討論如何從資料庫資料庫中的劣化影
	像進行 DRU 的評等,並以此標準編修
	每張照片之 DRU 值,將 DRU 修正到更
	合理且一致的值再供深度學習模型進
	行訓練與推估 DRU 值。有些照片的内
	容與 DRU 值的評定有不一致或不合理
	的問題,經分析主要原因可能是(1)有些
	橋檢人員將資料庫的照片當作有到現
	場進行橋檢的佐證資料,並非為了從影
	像上判識各種劣化類型。(2)現場拍照會
	受到環境的限制,無法完整或清楚的拍
	攝劣化區域。(3)橋檢人員的專業評定基
	進不一。
無人機 UWB 的架設及規劃是否會因不	本研究在測試階段是將 UWB 架設在地 同意辦理
同種類橋梁而有不同, 而 UWB 的建置	面上做測試,而將來在實際應用時會設
成本及時間,建議團隊可再補充說明。	計製作長竿從橋上往橋下垂直架設的
	方式佈建 UWB 基站,其中 RTK 放在長
	竿上端因無遮蔽適合 RTK 即時定位,
	再扣除長竿長度後推求得 UWB 站之高
	度,即可獲得長竿下 UWB 站之三維座
	標,並以此協助無人機上 UWB 移動站
	之即時定位導航。本研究目前還在測試
	UWB 的定位精度、適用性與訂定操作
	之標準作業程序,尚未進展到 UWB 架
	設數量與橋梁長度的測試,因此還無法

	評估架設時間。至於成本,UWB 感測器	
	的成本不高,反而是固定 UWB 站的長	
	竿,要如何適用於所有橋梁,且穩定又	
	容易拆裝,需要有很特殊的設計,而本	
	研究兩年內,應該僅會製作一個雛形,	
	未來實際應用後根據不同橋梁護欄形	
	式再持續改良,以提高其適用性。此外,	
	UWB 站的數量,雖然本研究經過測試	
	後建議至少4個,但在有遮蔽的情況下,	
	例如無人機環繞拍攝橋墩時,就會橫越	
	兩跨,則此時就應該使用 8 個 UWB 站。	
	而若要移動到第三跨拍攝前,第一跨的	
	UWB 站便可以事先移動到第三跨,以	
	完整拍攝整座橋梁。	
有關系統性整體運作架構,建議團隊補	是的,期末報告將會完整說明整體運作	同意辦理
充說明。	架構。	
三、莊東穎委員:		
目前深度學習是使用6種橋梁構件的影	目前僅使用 6 種構件的影像做訓練,其	同意辦理
像做訓練,能否增加其他構件,以利深	他構件有些劣化是影像無法辨識的,例	
度學習與精確辨識橋梁的劣化程度。	如一些幾何變形。而生銹、腐蝕、植被	
	生長這類在影像上的有特定紋理與色	
	彩特徵的樣態則有機會使用深度學習	
	進行自動辨識。	
目前辨識的 Model A 準確度(mIoU)只	一般公開的深度學習模型所使用的影	同意辨理
有 0.5518, 似乎仍偏低, 建議設法提升。	像都是以嚴格的標準去蒐集資料,在那	
	種情形下使用多是相對乾淨且高影像	
	品質的影像,因此預估的成果 mIoU 可	
	達 0.8 以上的準確度。而本研究則是直	
	接使用橋檢人員拍攝的影像去訓練,其	
	影像內容複雜度與影像品質不一致性	
	相對高很多,目前準確度確實還有進步	
	的空間,本研究將會持續努力提高精確	
	度。	
深度學習模型 DeepLabV3+與 DRU 的	本研究會持續改善 Deeplab V3+與 DRU	同意辨理
推估訓練,未來增加資料後,建議深入	推估模型的準確度,未來在資料增加後	
探討其可行性。	會依委員建議探討模型的可行性。	
無人機 3D 航線規劃系統,建議充實相	本研究會先使用目前所規劃的參數進	同意辨理
關參數內容以利精準檢測。	行開發與測試,若未來仍有不足之處再	
	進行改進與擴充。	
四、黃俊豪委員:	1	Γ
文獻回顧部分團隊分成橋梁檢測、深度	本研究會再持續搜尋與整合相關文獻,	同意辦理
學習、無人機技術三個方向撰寫,建議	並補充與本研究之關聯與是否哪些是	
文獻分析應有總結,除說明國外研發趨	值得借鏡的技術。	
勢,並說明可供本研究後續借鏡之作		

法。		
DERU 評等規範未來是有可能變動的,	將來若要使用 AI 進行劣化辨識與	同意辨理
一旦規範的數值修改,以現在團隊開發	DERU 自動評定,則現場橋檢人員的拍	
的辨識模式該如何因應,建議補充說	攝方式應該也要跟著改變,甚至要訂定	
明。	拍攝標準規範與重新訓練,使其拍攝的	
	影像能夠符合 AI 辨識的要求。若未來	
	DERU 的規範有修正,則深度學習模型	
	可能需要重新訓練或改變評定的規則。	
DERU 的 U 值決定橋梁管養單位要在	團隊目前經專家會議論後的編修標準	同意辨理
多少時限內完成維修,實務上與維護策	是沒有考量橋梁管養單位的管理維護	
略及資源有關,因此實際考量很多因素	策略問題,而是盡量以客觀的標準就單	
後,U值會避免給定4,建議研究團隊	一影像劣化情形去修正 DRU。目前深度	
或許可以考慮剔除 U 值,只使用 D、R	學習之訓練與推估,先不剔除U值,而	
進行訓練。	是在 APP 的設計上,由橋檢人員作最後	
	確認,再上傳到 TBMS 系統。	
研究團隊組成專家會議編修 DRU 值,	請參閱專家諮詢會議紀錄中之與會人	同意辨理
做為後續 AI 訓練之用,專家之組成係	員名單,其中有些是專家、有些是現場	
重要關鍵,是否與實務端有所落差,建	的橋檢人員,組成很多元,意見與回饋	
議再行檢視。	也相當廣泛,因此團隊會調和所有意	
	見,同時符合深度學習的特性去制定	
	DRU 的編輯原則。	
五、楊秉順委員:		
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說	本研究於期末報告中會補充一些文獻	同意辨理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團 隊 在 擬 定 計 畫 書 時 原 訂 使 用	同意辦理 同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團 隊 在 擬 定 計 畫 書 時 原 訂 使 用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將	同意辦理 同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團 隊 在 擬 定 計 畫 書 時 原 訂 使 用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用數據科學的潛規則推導	同意辦理 同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團隊在擬定計畫書時原訂使用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用數據科學的潛規則推導 DRU值。選用 DeepLabV3+的原因是因	同意辦理同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團 隊 在 擬 定 計 畫 書 時 原 訂 使 用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用 數據科學的 潛規則推導 DRU 值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團 隊 在 擬 定 計 畫 書 時 原 訂 使 用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用 數據科學的 潛規則 推導 DRU 值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模 型,有一些文章已經使用這個模型辨識	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團 隊 在 擬 定 計 畫 書 時 原 訂 使 用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用 數據科學的 潛規則推導 DRU 值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模 型,有一些文章已經使用這個模型辨識 劣化區域,且本研究過往也有使用這個	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團 隊 在 擬 定 計 畫 書 時 原 訂 使 用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用 數據科學的潛規則推導 DRU 值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模 型,有一些文章已經使用這個模型辨識 劣化區域,且本研究過往也有使用這個 模型進行辨識劣化的經驗。Lawin 為	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團 隊 在 擬 定 計 畫 書 時 原 訂 使 用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用 數據科學的 潛規則 推導 DRU 值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模 型,有一些文章已經使用這個模型辨識 劣化區域,且本研究過往也有使用這個 模型進行辨識劣化的經驗。Lawin 為 2022 年新發表的模型,基於 Vision	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團 隊 在 擬 定 計 畫 書 時 原 訂 使 用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用數據科學的潛規則推導 DRU 值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模 型,有一些文章已經使用這個模型辨識 劣化區域,且本研究過往也有使用這個 模型進行辨識劣化的經驗。Lawin 為 2022 年新發表的模型,基於 Vision Transformer 架構,在幾個影像辨識公開	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團 隊 在 擬 定 計 畫 書 時 原 訂 使 用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用 數據科學的潛規則推導 DRU 值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模 型,有一些文章已經使用這個模型辨識 劣化區域,且本研究過往也有使用這個 模型進行辨識劣化的經驗。Lawin 為 2022 年新發表的模型,基於 Vision Transformer 架構,在幾個影像辨識公開 資料庫有出色的表現,但目前未被使用	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團 隊 在 擬 定 計 畫 書 時 原 訂 使 用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用數據科學的潛規則推導 DRU 值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模 型,有一些文章已經使用這個模型辨識 劣化區域,且本研究過往也有使用這個 模型進行辨識劣化的經驗。Lawin 為 2022 年新發表的模型,基於 Vision Transformer 架構,在幾個影像辨識公開 資料庫有出色的表現,但目前未被使用 在橋梁劣化影像辨識上。經團隊測試,	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團 隊 在 擬 定 計 畫 書 時 原 訂 使 用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用數據科學的潛規則推導 DRU 值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模 型,有一些文章已經使用這個模型辨識 劣化區域,且本研究過往也有使用這個 模型進行辨識劣化的經驗。Lawin 為 2022 年新發表的模型,基於 Vision Transformer 架構,在幾個影像辨識公開 資料庫有出色的表現,但目前未被使用 在橋梁劣化影像辨識上。經團隊測試, DeepLabV3+模型較容易收斂,模型訓	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團 隊 在 擬 定 計 畫 書 時 原 訂 使 用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用數據科學的潛規則推導 DRU 值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模 型,有一些文章已經使用這個模型辨識 劣化區域,且本研究過往也有使用這個 模型進行辨識劣化的經驗。Lawin 為 2022 年新發表的模型,基於 Vision Transformer 架構,在幾個影像辨識公開 資料庫有出色的表現,但目前未被使用 在橋梁劣化影像辨識上。經團隊測試, DeepLabV3+模型較容易收斂,模型訓 練輿驗證可得到一致且良好結果,	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團隊在擬定計畫書時原訂使用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用數據科學的潛規則推導 DRU值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模 型,有一些文章已經使用這個模型辨識 劣化區域,且本研究過往也有使用這個 模型進行辨識劣化的經驗。Lawin 為 2022 年新發表的模型,基於 Vision Transformer 架構,在幾個影像辨識公開 資料庫有出色的表現,但目前未被使用 在橋梁劣化影像辨識上。經團隊測試, DeepLabV3+模型較容易收斂,模型訓 練輿驗證可得到一致且良好結果, Lawin 為較大的模型,模型訓練表現出	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團隊在擬定計畫書時原訂使用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用數據科學的潛規則推導 DRU值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模 型,有一些文章已經使用這個模型辨識 劣化區域,且本研究過往也有使用這個 模型進行辨識劣化的經驗。Lawin 為 2022 年新發表的模型,基於 Vision Transformer 架構,在幾個影像辨識公開 資料庫有出色的表現,但目前未被使用 在橋梁劣化影像辨識上。經團隊測試, DeepLabV3+模型較容易收斂,模型訓 練與驗證可得到一致且良好結果, Lawin 為較大的模型,模型訓練表現出 色優於 DeepLabV3+,但有過度擬合問	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團隊在擬定計畫書時原訂使用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用數據科學的潛規則推導 DRU值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模 型,有一些文章已經使用這個模型辨識 劣化區域,且本研究過往也有使用這個 模型進行辨識劣化的經驗。Lawin 為 2022 年新發表的模型,基於 Vision Transformer 架構,在幾個影像辨識公開 資料庫有出色的表現,但目前未被使用 在橋梁劣化影像辨識上。經團隊測試, DeepLabV3+模型較容易收斂,模型訓 練與驗證可得到一致且良好結果, Lawin 為較大的模型,模型訓練表現出 色優於 DeepLabV3+,但有過度擬合問 題,需有更多且多樣的訓練資料。此外,	同意辦理
第二章文獻回顧資料豐富,惟未充分說 明各種方式之優劣比較,與應用在本研 究有哪些部分,建議補充。 研究團隊 AI 深度學習採用 DeepLab v3 及 Lawin 之理由,以及與其他深度學習 方式有何優劣差異,建議補充。	本研究於期末報告中會補充一些文獻 分析的比較與心得。 團隊在擬定計畫書時原訂使用 DeepLabV3+辨識各式劣化類型,再將 辨識結果用數據科學的潛規則推導 DRU值。選用 DeepLabV3+的原因是因 為它是 Google 提出的一個影像分割模 型,有一些文章已經使用這個模型辨識 劣化區域,且本研究過往也有使用這個 模型進行辨識劣化的經驗。Lawin 為 2022 年新發表的模型,基於 Vision Transformer 架構,在幾個影像辨識公開 資料庫有出色的表現,但目前未被使用 在橋梁劣化影像辨識上。經團隊測試, DeepLabV3+模型較容易收斂,模型訓 練輿驗證可得到一致且良好結果, Lawin 為較大的模型,模型訓練表現出 色優於 DeepLabV3+,但有過度擬合問 題,需有更多且多樣的訓練資料。此外, DRU 推估模型則是一個很新的技術,本	同意辦理

	報告,因此仍處於研究與嘗試的階段。	
報告 P5、P112 工作項目內有至少選定	本研究會在期末報告補充詳細的工作	同意辦理
10 座橋梁辦理檢測影像的驗證,惟期中	項目,但需澄清的是本研究並未要求十	
報告未見該作業排程與規劃,建議補	座橋梁的拍攝工作,而是由運研所提供	
充。	十座橋梁的 TBMS 資料當作真值用以	
	驗證本研究開發之 DRU 推估模型的準	
	確定。由於資料清洗過程有許多不確定	
	性,包括這十座橋梁資料也需要先清洗	
	與 DRU 編輯,僅能大約預估時程會在	
	期末報告前一兩個月。	
報告 P48 請再補充 3D 模型建置方式及	本研究建議採用無人機拍攝低解析影	同意辦理
所需精度。	像,並以攝影測量方式進行橋梁 3D 建	
	模,建制精度需求最好是絕對定位誤差	
	小於 10 公分,相對定位誤差小於 5 公	
	分。本研究不建議採用地面光達建置3D	
	模型,因為很多橋梁下沒有空間可以架	
	站,尤其遇到簡支梁會遇到許多遮蔽問	
	題,掃描站數會大增,而採用無人機拍	
	攝影像建模,所拍攝之影像仍可應用深	
	度學習進行各式劣化類型的自動辨識。	
報告 P16 圖 2-13(無人機檢查橋梁作業	期末報告中將修正此問題。	同意辦理
情景與拍攝橋墩混凝土劣化之影像)未		
在主文說明,建議修正。		
報告 P81 提及 D=4 照片量不足,研究團	根據本研究的經驗調整權重參數可以	同意辦理
隊將採調整深度學習模型的權重參數	避免參數過度凝合的問題。後續本研究	
克服,建請補充說明此種方式與實際照	仍會增加訓練茲料,並在期末報告提出	
片學習之差異與影響。	相關驗證成果。	
報告 P88 表 4-5(橋墩/帽梁劣化評等)如	關於結構性裂縫之判讀問題,目前深度	同意辨理
何確實反映出結構裂縫的影響,建請補	學習模型並未特別與非結構裂縫區分,	
充說明。	因為這與裂縫所在位置相對於整個橋	
	梁構件之位置有關(幾何因素)。未來計	
	畫應該要考慮建置橋梁 3D 模型,並且	
	解算出裂縫(包括各式劣化類型)之三	
	維座標,以便在構件 3D 模型上研判該	
	裂縫是否為結構性裂縫。	
報告 P94 推估值之 U 值誤差大,其原因	此案例是因為 DRU=4 的影像資料偏	同意辨理
為何?後續如何修正?	少,訓練資料有類別數量不平衡的問	
	題,因此第三個例子的 DRU 推估誤差	
	較大,這問題未來會使用加權損失函數	
	抑制。	
報告 P106 自動規劃飛行路線,建請再	VIO 可解算載台於局部座標系之穩定	同意辨理
補充說明採用視覺定位及 UWB 之方式	位置與姿態變化,而 GPS 則是提供無人	
理由,另視覺定位需搭配 sensor 掃描深	機於橋梁外部無遮蔽情況下之絕對地	

度較利於避障,目前是否有納入配置。	理(全局)座標位置,UWB則是提供無人	
	機於橋梁下部分 GPS 訊號被遮蔽之情	
	況的絕對地理(全局)座標位置。彼此可	
	以互相補償,經過融合演算後可以提供	
	無人機於橋梁下與橋梁外連續且無縫	
	的全局定位導航目的。本研究之 VIO 視	
	覺定位就是使用深度相機,但避障部分	
	則是採用雷射避障感測器。	
採用 UWB 技術處理橋下無 GPS 訊號,	本研究在測試階段是將 UWB 架設在地	同意辦理
於長跨河橋與跨山谷橋梁如何布設設	面上做測試,而將來在實際應用時會設	
備,此外所需人力及費用部分,建議再	計製作長竿從橋上往橋下垂直架設的	
與傳統方式比較呈現其效益。	方式佈建 UWB 基站。本研究目前還在	
	測試 UWB 的定位精度、適用性與訂定	
	操作之標準作業程序,尚未進展到	
	UWB 架設數量與橋梁長度的測試,因	
	此還無法評估架設時間。至於成本,	
	UWB 感測器的成本不高,反而是固定	
	UWB 站的長竿,要如何適用於所有橋	
	梁,且穩定又容易拆裝,需要有很特殊	
	的設計,而本研究兩年內,應該僅會製	
	作一個雛形,未來實際應用後根據不同	
	橋梁護欄形式再持續改良,以提高其適	
	用性。此外,UWB 站的數量,雖然本研	
	究經過測試後建議至少4個,但在有遮	
	蔽的情況下,例如無人機環繞拍攝橋墩	
	時,就會橫越兩跨,則此時就應該使用	
	8 個 UWB 站。而若要移動到第三跨拍	
	攝前,第一跨的 UWB 站便可以事先移	
	動到第三跨,以完整拍攝整座橋梁。最	
	後在與傳統作業方式比較部分,由於傳	
	統上都是橋檢專家到現場以目視檢測,	
	有些橋梁要架設鷹架、使用橋檢車、或	
	使用小船,這些作業方式很難與無人機	
	作業方式比較。	
六、高公局:		
本研究主要內容為 AI 影像辨識及無人	本研究需在兩年內達到6項構件無人機	同意辦理
機技術開發,建議可設立階段性里程碑	檢測落地應用之目標,因此必須同時進	
逐步達成實用價值,如先達成無人機技	行無人機技術與 AI 深度學習自動辨識	
術開發(含 3D 建模、規劃無人航線、高	各式劣化類別的技術。其中無人機於橋	
解析拍攝構件等)輔以人工影像判讀劣	梁下無 GNSS 訊號時之定位技術乃是重	
化評等(檢評分離),優先達成無人機運	要關鍵,因此必須先行克服,未來才能	
用於橋檢之目標,其次再提升進階運用	有效推廣無人機於橋梁檢測之應用。若	
AI 影像辨識將相關影像或照片進行自	沒有方便操作,且精準定位之橋檢專用	
動化辨識,以達全自動化之檢測目標,	無人機,即使開發出相當精準的 AI 深	

而後綜整將相關成果自動介接至資料	度學習技術,也很難全面推動無人機橋	
庫系統,以達系統化管理目標。	梁檢測業務。	
本案無人機搭配 AI 影像辨識應用於橋	本研究兩年計畫所開發之技術將可定	同意辨理
梁檢測之研究,因現行「公路橋梁檢測	量估計劣化區之實際尺寸,其中裂縫寬	
及補強規範」之劣化評等表,係因應人	度部分雖會較實際尺寸寬,但仍可提供	
工目視檢測所訂定,故採定性方式判	可靠的定量資訊,協助制定劣化評等規	
定,惟為利 AI 影像辨識學習,局部採	則,達到自動評等的目的。或可提供法	
定量方式判定似更具可行性,爰建議法	制面修訂時之參考,但其修訂並非本研	
制面修訂亦可納入後續相關研究課題。	究之研究課題。	
七、臺灣無人機大聯盟:		
目前研發團隊所使用的 Y6 無人機的標	Y6 型無人機並非本研究之專利,而未	同意辨理
準規格應該釋放出來,才能做到產業	來橋梁檢測業務也不應強制要求使用	
化,而不能只有特定公司獨家供應。	Y6 無人機,僅會要求拍攝的影像品質	
	與空間解析度等(詳見期中報告 3.5.1	
	制定無人機拍攝橋梁影像之標準 )。而	
	本研究之所以特別設計與製作 Y6 型無	
	人機,是因為 Y6 型無人機可以安裝上	
	下旋轉 180 度的雲台與相機模組,同時	
	更換鏡頭即可拍攝不同空間解析度的	
	影像,因此只需一台無人機即可完成橋	
	梁檢測所有的拍攝需求,不需在作業過	
	程中因為變更相機位置而變更無人機	
	重心,所造成的可能危險。	
開發橋下無 GNSS 訊號之定位導航技	由於相關室內定位技術應用在橋梁檢	同意辦理
術,為本案研究最關鍵核心之一,報告	測上,在全球相關學術論文或無人機產	
中雖已有初步探討,惟建議進一步說	品中仍很少見到,故本項研究必須一步	
明,並持續精進之。	一步測試,由室內到室外,再進入實際	
	橋梁下。不只要高準確度,還需要高穩	
	定度,未來仍須測試各種橋梁環境,驗	
	證其適用性。期末報告中會進一步說明	
	相關實驗與定位精度測試的進度。	
橋下巡檢技術所要求之無人機, 需具抗	以無人機進行橋梁檢測,必須考慮到障	同意辨理
風、防撞及穩定飛航能力,建議研究團	礙物與碰撞墜機的風險,因此橋梁的高	
隊思考日後技轉及產業化之標準規格。	度與周遭環境必須有足夠空間讓無人	
	機飛行,因此本研究的願景是雖是應用	
	無人機拍攝的影像取代大部分的目視	
	檢測業務,但所預設的場域則是人員不	
	易到達、橋檢車無法抵達或人員不易近	
	距離檢視細微裂縫的橋梁,例如長跨河	
	橋與跨山谷橋梁。	
人工智慧學習之基礎資料為其關鍵,建	其實 TBMS 資料已經足夠滿足 AI 深度	同意辦理
議本研究再蒐集其他橋梁圖片資料庫,	學習的訓練需求,但就 DRU 的推估,	
做為模式演算精進之用。	需要不同 DRU 都有相似數量的訓練樣	
	本。而 TBMS 資料中, D=4 的樣本相對	

	少很多,因此才會造成深度學習參數過	
	度凝合的問題。	
文獻分析建議持續訪談國內產官學研	是的,本研究會持續觀察國內各界相關	同意辦理
各界,對運用無人機 AI 影像在橋梁檢	技術與應用的進展,並於期末報告中提	
測之研究與實務經驗,以吸取更多知	出相關分析與比較。	
識。		
八、港研中心(書面意見):		
由橋檢專家諮詢會議紀錄可知,橋管單	是的,經過專家們的建議,本研究所開	同意辦理
位會因劣化位置(非結構安全但有立即	發之系統會先透過 AI 提出所推估的	
危險)或經費考量調整 DRU 評等,該等	DRU 評等結果,最後再由橋檢專業人員	
作法是無法透過 AI 辨識去反映出來,	確認後才能上傳到 TBMS。	
並與實務有所落差,建議或許可將本系		
統定位為初篩工具,AI產出之結果可保		
持彈性,交由專業人員去做最後判定,		
相較於現行目視檢測作業,已可大幅提		
升橋檢作業效能及品質。		
客製化橋檢專用無人機(含 UWB)開發	本研究仍在研究與實驗階段,必須先確	同意辦理
成本為何?是否能被市場接受?而市場	定所開發之融合定位演算法能提供無	
接受性亦會影響工具落實性。	人機於橋下穩定與準確的定位資訊。初	
	步評估 UWB 的成本仍在可接受的範	
	<b>崖</b> 。	
UWB 訊號範圍為何?請於報告中補充	此項測試仍在進行中,未來在期末報告	同意辦理
說明。	中將會有完整的測試報告。	
目前訓練樣本係採資料庫內局部劣化	關於裂縫之影響範圍 E 值的設定,本研	同意辦理
照片進行訓練,也因此無法得知整體構	究可以計算同一構件中所有裂縫的長	
件範圍致無法判斷 E 值,未來本研究目	度與面積,但之後如何推估 E 值需要再	
標為建置全橋三維模型並構件化編碼,	與橋檢專家討論。	
係可達量化 E 值之需求, 對於面狀劣化		
(如混凝土剝落、白華、滲水等)按規範		
評等準則係為與整體構件之面積比,但		
對於線狀劣化(如裂縫),因裂縫寬度細		
小通常為釐米級,若採裂縫寬度 x 長度		
與整體構件面積比則不甚合理,規範計		
算基準為何?是否與實務操作有所落		
差?建議研究團隊可進一步釐清。		
圖 4-35、4-36,紅圈及綠圈代表之路徑	此二圖中紅圈為 VIO + GPS + UWB 融	同意辦理
為何?真實路徑是否有套繪於 Google	合演算後的路徑,綠圈則純粹是 GPS 量	
map 上?建請補充說明並標示清楚,以利	測到的路徑。成果顯示融合 VIO 及	
清楚呈現測試成果。	UWB 後可提供更穩定的軌跡。至於	
	"真實路徑"部分,目前尚未使用其他	
	更準確的方式進行測量,故無法同時套	
	疊比較。因為有架設 UWB, UWB 架設	
	位置為 RTK 定位,可將 UWB 位置及經	
	過融合演算推算出來之相對位置套疊	

	在 Google map 上面。圖 4-35 及 4-36 之	
	底圖即為 Google map 衛星影像。	
九、運工組(書面意見):		
AI辨識目前採用的模型是 DeepLabV3+	DeepLabV3+為 Google 開發的模型,模	同意辦理
與 Lawin,在深度學習的領域內相對是	型在 2019 年更新到第三版,近幾年多	
開放的,並不需要付費購買,建議研究	個期刊論文證明此模型可成功使用在	
團隊補充說明此二模型之優缺點。	裂縫劣化類別辨識上。Lawin 為 2022 年	
	新發表的模型,基於 Vision Transformer	
	架構,在幾個影像辨識公開資料庫有出	
	色的表現,但目前未被使用在橋梁劣化	
	影像辨識上。經團隊測試, DeepLabV3+	
	模型較容易收斂,模型訓練與驗證可得	
	到一致且良好結果, Lawin 為較大的模	
	型,模型訓練表現出色優於	
	DeepLabV3+,但有過度擬合問題,需有	
	更多且多樣的訓練資料。	
研究團隊已初步制定橋梁各構件拍攝	AI 辨識各式劣化類型,所需的影像拍攝	同意辦理
作業標準,但僅是針對高解析影像及低	方式原則與所制定的拍攝作業標準一	
解析影像進行規範,其中低解析影像的	樣,僅有高或低解析影像的差異。其中	
目的為製作橋梁 3D 模型,而高解析影	高解析影像可應用在所有劣化類型,但	
像的的則是以偵測裂縫為主,但 AI 辨	低解析影像則無法應用裂縫偵測上。	
識的應用上有無特殊的拍攝要求,建議		
仍應從空間解析度、拍攝角度、亮度等		
進行評估。		
影像辨識的準確率簡報中提及 mIoU 指	mIoU與mAP這些指標適用於影像分割	同意辦理
標,國際文獻亦也有採用 mAP 平均像	的精度驗證,但後續 10 座橋梁的驗證	
素準確率的指標,請研究團隊於後續工	僅有 DRU 值,所以比較簡單只有對與	
作會議,提出選定出 10 座橋梁採用之	错的準確度分析。	
驗證指標。		
報告內容用詞,建議應更淺顯易懂,例	此處所謂的「噪聲」英文為 Noise, 也可	同意辦理
如 P46 校正 IMU 的「噪聲」,其中 IMU	翻譯為「雜訊」,在不同學術領域有不同	
為價性感測器,為何產生「噪聲」,建議	的翻譯方式。	
補充說明。		
報告 P48 提及以無人機拍攝影像,並利	本研究第一年僅會進行相關深度學習	同意辨理
用 AI 模型辨識劣化類型及程度,此部	模型的開發與精度驗證分析,而無人機	
分研究團隊今年度是否會先進行測試,	技術則是著重在無 GNSS 訊號時之定位	
建議補充說明。	演算法開發與定位精度分析。本研究要	
	到第二年才會實際應用無人機進行實	
	測航拍三座橋梁,並應用第一年所開發	
	之深度學習技術。	
報告 P50 圖 3-2 中, 有關 AI 學習訓練	是的,期末報告相關部分會改進說明方	同意辨理
與驗證,其與最後成果之驗證,兩者意	式。	
義並不相同,建議修正文字或加註說		
明。		

十、陳副所長天賜:		
有關今年度計畫預計選取 10 座橋梁之	感謝公路總局與高速公路局的協助。	同意辨理
劣化構件照片做 AI 影像辨識部分,請		
研究團隊後續於工作會議與高公局及		
公路總局共同研商選取,同時橋梁檢測		
資料結果亦請兩局先行檢視合理性。		
十一、主席結論:		
審查會議各委員及與會單位研提之口		同意辨理
頭及書面意見,請國立成功大學研究團		
隊整理「審查意見處理情形表」,且逐項		
說明回應辦理情形,並充分納入報告之		
修正。		
本研究經徵詢審查委員意見,期中報告		
初稿審查通過,請國立成功大學研究團		
隊後續依本所出版品印製相關規定撰		
寫報告,並納入每月工作會議查核事項		
進行追蹤。		

# 附錄 2: 期末報告審查意見處理情況表

交通部運輸研究所□合作研究計畫□委託研究計畫

### □期中√期末報告□會議□書面□複審

# 審查意見處理情形表

計畫名稱: 無人機搭配 AI 影像辨識應用於橋梁檢測之研究(1/2)-橋梁劣化構件 AI 影像辨識之技術開發

執行廠商:國立成功大學

中本手马/四八下中日	北江市中市市市	本所各組及中心
奋 <u>但安</u> 貝/单位之息兒	<u> </u>	審查意見
一、楊秉順委員:		
本研究成果超前進度,原定112年	感謝委員的肯定。	同意辨理
無人機自動規劃飛行路線程序納		
入 111 年辦理,且成果呈現良好,		
值得肯定。		
期末報告書建議逐項列出應辦理	期末報告之章節抬頭是按照本計畫研究	同意辦理
事項,並對應實際成果展現,例如	主題與重點命名,僅順序不同,且10座	
10 座橋梁之辨識驗證成果說明。	橋梁之驗證成果部分,最後實際進行 14	
	座橋梁,相關說明已在期末報告。	
報告 P56 表 2-16 比較內容建議再	將單位名稱改以代號取代,並將公路總局	同意辨理
洽公路總局二工處釐清,因為各單	二工處從比較表中移除。	
位採用基礎不同,能否進行比較,		
請再檢討。		
報告 P72 及 P76,未來劣化程度範	第一年計畫要求使用 TMBS2 資料庫,因	同意辨理
圍推估需輸入 E 值,如何輸入? 且	單張影像無法正確獲得 E 值,故使用	
判斷標準是否仍需人工處理?請補	TBMS2 資料庫內的 E 值為輸入值。判斷	
充說明。	標準目前是採用電腦自動辨識。	
報告 P83 拍攝 I 型大梁間之狀況需	無人機以傾斜攝影方式拍攝時,一般是透	同意辨理
控制相機角度,實際操作該如何處	過調整相機雲台的角度來達成。若要一個	
理?有無辦法可一次飛行拍攝完	架次拍攝整座橋,除了要有精準的定位技	
成?此外受限角度問題,未來航線	術與有效的航線設計外,飛行的速度要快	
如何設定?	(相機記憶卡寫入速度也要很快)、總航程	
	要短(也就是橋梁結構要簡單且總表面積	
	要少)。此外若無人機體積尺寸小,有機會	
	可以飛入兩個 I 型梁之間垂直攝影。	
報告 P97 未來長跨度橋梁架設	目前針對 UWB 測試中發現,雖然 3 個	同意辦理
UWB 該如何處理,建議補充說明。	UWB 基站已經可以提供可接受的水平方	
	位定位(X 及 Y 軸),但是 4 個 UWB 基站	
	將可增加垂直方位(Z 軸)的定位精度。未	
	來長橋的 UWB 架設方式,將會是在橋梁	
	一跨的4個端點架設4根長竿,形成一個	

	2D 平面的方式進行架設。若橋梁長度超	
	過 UWB 有效範圍,就必須增加 UWB 基	
	站的數量。	
報告 P108 表 4-4 三種劣化模式	原 DERU 之規範未將銹水列入主要裂化	同意辦理
class1~3 與報告 P74 模型 1~3 類別	類別,但會影響類別三(滲水、白華)嚴重	
不同,建議釐清修正。	程度之判斷,因此在 DRU 預測模型中,	
	將銹水同滲水、白華一併考慮。	
報告 P115 研究單位對於未來結構	未來可以使用橋梁構件 3D 模型,製作正	同意辨理
裂縫與非結構裂縫區別要如何進	射影像,在正射影像上以 AI 偵測裂縫,	
行?另外裂缝方向性是否有辨法	如此即可獲得裂縫的實際寬度,以及相對	
判讀?請補充說明。	於構件的位置,再透過其走向判斷是否為	
	結構裂縫。	
報告 P133 目前採用 3D Model, 再	目前仍在研究與測試階段,尤其是 UWB	同意辦理
加上 VIO+UWB/GPS 等方式處理	的廠牌很多,哪一款最合適仍需經過許多	
定位,建議個別呈現比較費用,以	測試與驗證,故目前仍無法提供相關費	
利執行機關參考。	用。而未來執行機關在執行此類工作時,	
	可以委託專業無人機與航測顧問公司協	
	助影像拍攝與 3D 建模等資料處理。本計	
	書僅是開發相關技術,這些顧問公司在估	
	算成本時會有各自的考量,因此不應該由	
	本團隊協助估價。	
	本研究整體測試作業較完備後,將彙整無	同意辦理
市面上無通用機型,未來推廣方式	人機拍攝的標準作業流程及規格需求,以	
如何處理?日製作費用為何?建議	利其他無人機業者変製化適合本作業之	
補充說明。	楼刑, 並應用此技術進行橋梁巡檢。爰不	
	會規定僅能使用太團隊所開發的無人機	
	款式才能進行作業。	
	淮度甘特圖已經修改成實際狀況,另太年	同音辦理
昭實際狀況道列:另其他相關工作	度計書並無其他相關工作,因此這部分不	
建議	准行修改。	
報告 P173 整體執行成果過程建議	費用估算部分在前面已經炫覆渦,在此省	同音辦理
補充哪此部分為人工處理、自動處	败。至於較個處理程序,僅無人機低解析	
理,並建議說明相關費用,以利參	影像拍攝、橋梁 3D 建模、高解析影像拍	
去。 去。	据之前编码针、三解析影像空三亚美女人	
- 7	下虚理,其他便真解析影像拍摄、正射影	
	使製作、AI 尘化值测、DFRII 評笔與製	
	作棒輪報生則是令白動處理。但在產製棒	
	格報生前,仍要人下介入派一輪放崩破訊	
	冬播件之劣化評笔值。詳目 13 箭之世	
	证(11711~710町寸匠町九1.17日)~1曲	
出生去 4-10, · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	口依正	同音辦理
HR口公 F10,义丁沃倍,廷硪止荷 档刑 3。		门忌州土
(K土) 	口依正	同音辦理
11K口「伯尘木乃翊丁明王闻伮伉,		门忌州土
刀奶既廷硪休用沉靶人够子。		

規範中劣化類型並無銹水,為何要	規範劣化類型滲水、白華較為嚴重狀況包	同意辦理
訓練模型偵測銹水,建議補充說	括銹水流出,因此必須訓練銹水辨識。	
明。		
二、黄其彦委員:		
依報告中所呈現之資料,本案已依	感謝委員的肯定。	同意辦理
合約履行完成。		
報告中對於所使用之 AI 辨識模式	模型結構細節與超參數將寫入期末報告	同意辦理
似乎沒敘述清晰,若未來別人要使	修正版內或提供參考文獻。	
用或接續研究,實在無法瞭解如何		
建置模型,此外 AI 模型的細節參		
數如何修改,神經元層數、神經元		
個數、學習方式、所用平台運算效		
能等,建議再補充說明。		
報告中僅有 DeepLab v3+及	期末報告修正版已納入 DeepLab v3+、	同意辦理
DeepLab v3++的比較,建議再與其	DeepLab v3++、Lawin 比較說明。	
他研究方法做比較,增加研究方法		
的合理性。		
報告中對於不同 AI 技術有不少敘	期刊論文所提 AI 技術用於不同目的與資	同意辦理
述,但各種演算法成效之比較不是	料,而各種演算法成效之比較需在同一個	
很明顯,特別是針對本案用到的橋	資料與基準才有意義。本計畫已針對	
梁 3D 影像。此外報告中比較多值	DeepLab v3+ 、DeepLab v3++ 、Lawin 三	
化敘述,但量化比較相對較少,建	種模型,進行各項影像辨識指標比較,包	
議再補充說明。	括精確率、召回率等。	
三、黃維信委員:		
報告中提到 DeepLab v3++與 Lawin	DeepLab v3++與 Lawin 模型訓練時影像	同意辦理
模型所用照片解析度不同,將來是	解析度不同,模型訓練好後可使用於不同	
否需要無人機分2次拍攝,或無人	解析度照片, 無需分2次無人機拍攝。	
機同時搭載高低解析的相機同時		
拍攝?		
報告 P10 圖 1-3 打 X 的部分意義為	打 X 表示沒有合適的照片製作正射影像,	同意辦理
何?將來有辦法克服解決嗎?	例如空間解析度不足或傾斜攝影角度太	
	大等。此資訊亦有助於評估無人機業者拍	
	攝的完整度,同時了解哪些地方需要補	
	拍。這些打 X 的地方通常是傾斜攝影角	
	度太大或空間解析度不足所致,未來僅能	
	仰賴無人機小型化, 飛入這些狹小空間中	
	拍攝。	
報告 P68 不同劣化辨識模型,採用	拍攝。 期末報告修正版已補充說明。	同意辦理
報告 P68 不同劣化辨識模型,採用 的資料增強函數不盡相同,請補充	拍攝。 期末報告修正版已補充說明。	同意辦理
報告 P68 不同劣化辨識模型,採用 的資料增強函數不盡相同,請補充 說明本研究工項不同劣化類型所	拍攝。 期末報告修正版已補充說明。	同意辦理
報告 P68 不同劣化辨識模型,採用 的資料增強函數不盡相同,請補充 說明本研究工項不同劣化類型所 採用的資料增強函數,並將其整理	拍攝。 期末報告修正版已補充說明。	同意辦理
報告 P68 不同劣化辨識模型,採用 的資料增強函數不盡相同,請補充 說明本研究工項不同劣化類型所 採用的資料增強函數,並將其整理 成表格說明。	拍攝。 期末報告修正版已補充說明。	同意辦理
報告 P68 不同劣化辨識模型,採用 的資料增強函數不盡相同,請補充 說明本研究工項不同劣化類型所 採用的資料增強函數,並將其整理 成表格說明。 請補充說明報告 P73 本研究為何選	拍攝。 期末報告修正版已補充說明。 語意分割模型指 DeepLab v3++與 Lawin	同意辦理

為何?請補充說明。		
報告 P74 所提,當單個像素被預測	語意分割模型有兩個(模型 A 與 B),當影	同意辦理
成不同的劣化類別時,會以模型 A	像像元辨識有重疊時,以模型 A(銹水、裂	
之預測為優先;若某像素二模型皆	縫)為優先。	
預測非為背景,則以模型 B 之結果		
作為預測的劣化類型。請補充說明		
其考量。		
報告 P9 流程圖中「固定 E 值推估	因第一年計畫使用 TMBS2 資料庫,且單	同意辦理
DRU」是否為誤植?請補充說明。	張影像無法正確獲得 E 值,故使用	
	TBMS2 資料庫內影像的 E 值為輸入值。	
報告中引用參考文獻的圖表須註	已全面修正	同意辦理
明出處,建議修正。		
人工標註劣化照片時,因 D=4 的照	權重參數可抑制資料不平均問題,但無法	同意辦理
片數量偏少,在無法取得更多照片	提高資料多樣性,最好解法是在資料端解	
的情況下,以調整深度學習模型的	決此問題,但在無更多訓練資料情況下,	
權重參數克服,請說明可能帶來的	此方法可在資料不平均之下讓深度學習	
影響。	模型達到相對好的收斂。	
報告 4.4 節所提用於深度學習訓練	本計畫在訓練劣化偵測模型時發現有兩	同意辦理
的影像資料為 4,262 張, 與 4.2.4 節	張相同內容的照片,但D值不同,經過人	
表 4-6 所列 4,263 張不一致,建議	工編輯 DRU 後,將重複的照片移除,故	
修正。	最後為4,262張照片。期末報告修正版會	
	將數量統一為 4,262 張。	
目前可再取得的訓練資料似乎已	TBMS2 中 D=4 的訓練資料很難再增加,	同意辦理
相當有限(D=4),如何再提高模型辨	但深度學習模型與訓練仍有進步空間。	
識的精準度?請補充說明。		
無人機飛行的震動會造成拍攝之	會以補光、降低曝光時間、選用有防手震	同意辦理
影像模糊,團隊有何解決方式?請補	功能的相機及鏡頭等方式來降低無人機	
充說明。	飛行震動所造成的影響。第二期若測試後	
	仍有需要,將規劃加裝減震裝置。	
UWB 的建置時間和成本、無人機	目前尚未實際應用於橋梁檢測作業,明年	同意辦理
拍攝後的照片儲存成本、AI模型運	會設計出 UWB 架設雛型進行實際測試,	
算所需伺服器成本、Y6 無人機的成	而在實測過後將可對建置時間及成本提	
本,建議團隊可補充說明。	出較佳的方案及評估。	
四、黃俊豪委員:		
本研究使用大量人工拍攝照片及	劣化類型3影像R值與U值連動,DERU	同意辦理
多種 AI 演算法就常見劣化類型建	多樣性較少,使用目前少訓練樣本集沒有	
立 DRU 推估模型, 並使用該模型	過度擬合問題發生,相較之下,而劣化類	
就 14 座橋梁進行驗證,依據簡報	型1與2資料 DERU 多樣性較高, AI 模	
第 38 頁所示驗證成果,使用該模	型有明顯過度擬合,詳見4.5.3節。	
型針對劣化類型 3(滲水及白華)推		
估 DRU 值之正確率介於		
90.2%~94.5%,應可進行實務應用;		
另劣化類型 2(混凝土剝落、鋼筋外		
露、銹蝕)之正確率介於		

57.1~82.4%,劣化類型1(裂縫)之正		
確率介於 60.8~91.3%, 均具較大差		
異,其可能原因為何?建議可詳加		
探討。		
前述偏誤多出現於輕微劣損(DRU	偏誤出現於明顯劣損(DRU=4),因為訓練	同意辨理
值 1~2)或明顯劣損(DRU 值 3~4),	資料偏少;推估結果偏向於保守側(高估	
而推估結果多偏向於保守側(高估	DRU 值)與非保守側(低估 DRU 值)相當。	
DRU 值)或非保守側(低估 DRU		
值),建議補充說明。		
有關 Deeplab V3++於裂縫的 OE 高	裂縫的漏授誤差(OE, Omission Error)較其	同意辨理
達 36.36%,主要原因為何?	他劣化多主要有兩項因素,一是由於裂縫	
	所占影像的像素比例非常極端,在一張影	
	像上僅有極少部分的像素是屬於裂縫,因	
	此只要辨識成果較寬一個像元,就會對整	
	體的劣化指數有格外明顯的影響;二來是	
	本次使用的影像解析度不一,解析度不夠	
	的情形下對於細小的裂縫就容易有疏漏,	
	雖然模型已經針對這樣類別不平衡的情	
	況進行處理,但還是不易將其辨識出來。	
	未來還會對此部分再繼續改進。	
倘全數照片均使用 UAV 並依團隊	以 UAV 並依建議之 SOP 拍攝,其精度理	同意辨理
建議之 SOP 拍攝,其精度是否能明	論上應可大幅提升,第二期將持續並精進	
顯提升?倘仍有提升空間,則建議	辨識功能。	
明年度仍可持續改良 AI-scanner。		
簡報 P29 的誤差是指未判識出劣化	期末審查會議的簡報 P29, OE(Omission	同意辦理
類型,還是指劣化類型判識正確,	Error)是漏授誤差,指模型對於該劣化類	
建議補充說明。	別的漏授程度,應屬於該類別卻未被判識	
	成功而造成的誤差;而 CE(Commission	
	Error)是誤授誤差,指模型將其他類別誤	
	判成該劣化類別的誤差。	
DERU 模型的準確率瓶頸為何?是	DERU 評定在資料清洗有進行評定一致	同意辦理
因為照片數量不足?亦或是 DERU	化程序,目前 DERU 模型的準確率瓶頸	
評定方法本身設計所致,請補充說	為訓練資料數量與多樣性不足。	
明。		
有關主要劣化類型是否均能自動	可以自動辨識,在本計畫三種神經網路模	同意辦理
辨識,正確率為? 請補充說明。	型驗證成果的數據是使用了地真資料去	
	對每一張影像計算出最適合的門檻值所	
	得到的辨識成果,可視為該模型可達到的	
	最佳精度值。而若是後續使用時沒有地真	
	資料,也可以自訂門檻值,本團隊後續也	
	會透過此研究使用的資料集為各個類別	
	計算出一半均門檻值,推薦給未來的使用	
	者進行成果辨識,後續再依其資料集進行	
	調整即可。	

	上述裂化類別除裂縫外,準確率均可達到	
	7成以上,而裂縫則為近6成左右。	
關於各劣化模型間之比較,本研究	以剥落為例,漏授定義為剝落像元中有多	同意辦理
採用漏授(Omission error, OE)進行	少比率的像元沒有被偵測出來。漏授與劣	
精度比較,該指標代表之意義為	化辨識有關,與 DRU 無關。OE 值越低代	
何?其與 DRU 之關聯為何?另整	表誤差越小,模型表現越好。	
體而言, Deeplab V3++之 OE 值較		
低,其誤差分佈及成因為何? 請補		
充說明。		
五、許書耕委員:		
報告 P114、P115 內容重複過多,建	已修正	同意辦理
議充新檢視修正。		
劣化類別的標示顏色不夠直覺,建	感謝委員的建議,未來在系統開發時會考	同意辦理
議修改如下:	量委員的建議。	
原色英 日本		
劣化频 <del>设研</del>		
医脾巴		
目前使用資料庫資料訓練 AI 模型,	使用 TBMS2 資料訓練的模型可使用無人	同意辦理
其影像品質與無人機拍攝品質有	機影像進行微調(fine-turn),以達最佳結	
所差異,對後續使用無人機拍攝影	果。同時以 UAV 並依建議之 SOP 拍攝,	
像進行 AI 辨識有何影響,建議補	其辨識精度理論上應可大幅提升。	
充說明。		
AI 影像辨識成果有 12 種指標呈現	單一指標無法完整呈現成果好壞,可以精	同意辦理
較不直觀,能否用單一整體的指標	確率或召回率為主,其他指標為輔。	
表示成果好壞,請補充說明。		
有關 3D 模型建置及儲存經費能否	費用估算部分前面已經答覆過,在此省	同意辨理
估算,後續如何介接整合資料庫系	略。至於所製作的 3D 模型,是否要包括	
統亦是可以研究之方向,並提出相	正射影像貼圖,若需要則資料儲存空間需	
關解決方案。	要很大,TBMS2 是否能接受此種資料格	
	式,還需要與TBMS2的研發人員討論。	
	本團隊期待將來研發成果能被全面應用,	
	並與 TBMS2 介接,但這需要經過多次實	
	際案例測試與專家審核,以及許多橋檢人	
	員測試驗證後才能定案。	
建立 3D 構件模型為本研究重要關	本團隊仍在持續相關研究,目前研究方向	同意辨理
鍵,建議團隊持續研究尋找更便宜	為配合橋梁 3D 點雲建置橋梁構件 BIM	
且快速的建模万式。	模型, 裂作具貫尺寸的 BIM 模型, 估計	
	建模效率曾大增,成本也曾大幅下降。	
图	日前研究對家為混凝土箱型梁橋、板橋與	问意辨理
合使用無人機檢測,而哪些不適	間支采橋,但因目前所設計的無人機要搭	
合,供建研所及橋官機關參考。	載尚解析相機,故整體尺寸較大,為了保	
	留安全距離,預估可應用的橋梁大梁底部	

	離河面之高度需大於7公尺。	
六、高速公路局		
報告 P106 表 4-3 所列劣化類型為	表 4-3 在「特徵形式」與「AI」之欄位描	同意辦理
「阻尼裝置」及「所轄範圍河床之	述,係針對不適合進行深度學習的補充說	
潛壩、固床工、河堤建造物等」定	明。考量若干劣化項目,透過自動影像辨	
義不清一節,可再確認規範評等	識時會有執行上的困難,故表 4-3「特徵	
表,其劣化狀況說明已有包含劣化	形式」欄位使用「定義不清」來表達,與	
類型。	規範評等表之用途不同,相關內容可參見	
	第 103 頁第 4.1.2 節。	
報告 P114~P115 所提 DRU 將不會	本計畫之適用範圍及 DRU 之評定對象為	同意辦理
有 443 情況發生,請再確認規範評	鋼筋混凝土橋梁,未包含鋼橋。如為鋼橋	
等表,如鋼結構橋墩評等表之螺栓	仍應依照規範評等表辦理檢測工作。	
損傷評等值 R=4 時,規範容許 U=3		
或4;支承/阻尼裝置評等表之阻尼		
裝置移動異常有顯著功能障礙,當		
評等值 R=4 時,規範容許 U=3 或		
4 •		
報告 P114「量測裂縫水平與垂直的	此乃專家諮詢會議中某位專家之建議,未	同意辦理
裂縫長度,以長度與寬度相乘就可	來實作後,會再徵詢更多專家之意見,以	
得到面積,再與全部面積相比即可	便得到較準確的準則。	
得到百分比 E 值」,此計算方式裂		
縫範圍恐有低估,與E值評等原則		
有差異。		
報告 P128 表 4-12 其中兩張照片相	此處為誤植,第一張照片發生滲水與白華	同意辦理
似,其評等值 DRU 分別為 333 與	所以是222,如果同時伴隨銹水,這時才	
222,請再確認。	會是填 333,以上是目前 DRU 修正的原	
	則。	
簡報 P35 DRU 推估模型驗證結果	此驗證成果會放入期末報告修正版中。	同意辦理
建議放入期末報告。		
高速公路橋梁3車道加路肩之橋寬	目前進行之 UWB 訊號範圍測試,雖然已	同意辦理
度約為 16 公尺,南向及北向通常	經得知該品牌之穩定範圍至少是 20 m x	
距離較近,造成橋下遮蔽寬度約為	90 m,但是並非有效範圍只有 20 m,而	
32.6 公尺,團隊所提 UWB 之橋寬	應以 4 個 UWB 基站之對角線距離來計	
限制是否可突破,建議補充說明。	算,亦即(X2+Y2)^0.5 的距離為 UWB 訊	
	號有效距離。	
目前 UWB 測試之橋梁多為單柱	會,若僅在一跨四個角落各使用 1 個	同意辦理
式,但有些橋梁為多柱式,UWB 是	UWB 基站,當無人機飛到另一跨時,就	
否會造成斷訊問題?請補充說明。	會有遮蔽現象,故需要在另一跨四個角落	
	亦佈置1個UWB基站,總共8個UWB	
	基站,對於橋墩的拍攝作業會比較沒有遮	
	蔽現象。	
七、公路總局		
報告 P53 第3 行本局目前無人機系	感謝委員提供之資訊,已在修正報告中更	同意辨理
統採用 Samsung Galaxy S20 Ultra	正。	

手機,非 iPhone 13 Pro 等手機。		
報告P80建議拍攝方式中提到拍攝	可能的做法是將無人機小型化,或者如委	同意辦理
角度不要超過 45 度,在實務橋檢	員所說於 UAV 上架設延伸桿,將相機伸	
中若梁較深則梁側表面無法拍攝	入窄小空間進行拍攝,但後者作法容易造	
處甚多,有無其替代方案或於 UAV	成 UAV 不平衡而摔機問題,困難度相當	
上另設延伸桿,將相機伸入窄小空	高。	
間進行拍攝作業。		
報告P91 無人機完成航線規劃後進	無人機自動飛行的拍攝成果,要先使用	同意辦理
行自動飛行拍攝,其相關照片再匯	Metashape 這類航測專業軟體進行空三平	
入 3D 橋梁模型時是全自動匯入還	差解算所有照片之內外方位參數,這部分	
是需人工額外輔助作業?	工作相當專業,無法全自動處理。	
報告 P94 Sony 單眼相機快門次數	費用與成本估算部分前面已經答覆過,在	同意辦理
有其使用上限,即相機亦為耗材之	此不再重複說明。	
一,請研究團隊在評估成本時一併		
列入,以應未來實務應用之需。		
報告 D=4 的橋梁構件劣化照片數	訓練資料不足最根本的解決方式只有蒐	同意辦理
量相對較少,而團隊使用變更權重	集更多訓練資料。增加權重等於增加模型	
方法解決此問題,請說明變更權重	在訓練學習該類別時使用的梯度,進而加	
為何能解決訓練資料不足的影響。	大模型對錯誤判識該類別 DRU 值之反	
研究團隊在 AI 系統學習訓練階段	應。此方法雖能使訓練資料之精確度提	
應思考照片數量不足的訓練方式,	升,但無法增加資料之多樣性及 AI 模型	
否則最後 AI 系統針對 D=4 的劣化	推廣至其他資料的能力。	
態樣恐無法達到預期的辨識能力。		
部頒「公路橋梁檢測及補強規範」	本案未來研究將結合橋梁構件 3D 模型與	同意辦理
中主要是針對結構裂縫作劣化評	AI 偵測之裂縫走向研判是否為結構裂	
等,然目前 AI 系統仍無法特別篩	縫。目前作法可以提升橋檢之完整度,並	
選是否為結構裂縫,此部分在未來	建立多時期檢測履歷,有利於研判同一裂	
DERU 自動判釋後仍需由人工再作	縫是否有惡化的情況,而且甲方也可以不	
一次檢核,且依報告 P115 所述 AI	用到橋梁現場,即可進行全面的抽查乙方	
檢測仍可能定位為初篩的層級及	的橋檢報告。	
功用,但此方式對橋檢人員是否能		
增加工作效率及橋梁構件漏判、誤		
判之責任轉移仍有待商確,仍請於		
未來 AI+UAV 強制加入橋檢執行前		
再行評估。		
八、臺北市政府		
AI 模型的辨識率如何定義,是指全	語意分割之各精度指標已列於報告中,皆	同意辨理
橋所有缺失個數相對於有多少被	為像素級之精確度,亦即被模型準確辨識	
AI 模型辨識出來的比例嗎? 請補	出來的像素數相對於整體的比例,而各劣	
充說明。	化指標的計算公式已列於書面報告第三	
	章 3.3 節。	
招標共通性規範中,未來如何編列	目前研究仍在進行中,許多技術細節仍未	同意辨理
預算,及如何區分現行人工檢測及	確認,且未來廠商使用哪種技術與設備亦	

充說明。	至於本案適用範圍為招標文件所列之六	
	大構件與三大劣化類型。	
本案開發之系統,未來甲方如何檢	本案將開發桌機版 AI-IBBIS 視窗程式,	同意辦理
核乙方所提供的橋檢成果? 請補充	供乙方處理無人機影像,包括確認與編修	
說明。	本系統以 AI 偵測之劣化類別、自動評定	
	之 DERU 值與所製作之橋檢報告。所有	
	成果都交付給甲方,因此甲方也可以使用	
	同一系統,根據每筆 DERU 報表,逐一稽	
	核乙方之橋檢報告與 DERU 值。詳見 4.12	
	節委外招標共通性範例之說明。	
現行人工檢測橋檢公司會提供修	本案建議之橋檢流程屬於(檢評分離),至	同意辦理
繕建議,由橋檢公司負責(檢評合	於單獨委外或共同招標,要由橋管機關自	
一),若委託無人機公司檢測是否需	行決定。	
將檢測成果再委外橋檢公司針對		
檢測成果提出修繕報告(檢評分		
離),若改成檢評分離時,地方單位		
是採單獨委外?或共同招標?標別不		
同則有不同的責任歸屬問題。		
九、宜蘭縣政府		
報告 P69 第 2、3 行銹水及滲水的	已於期末報告修正版第三章 3.3 節補充說	同意辦理
影像類別為何不同?建議補充說明。	明。	
報告 P60 表 C3.3.2 及 C3.3.8 表在	感謝委員提供之資訊,已在期末報告修正	同意辦理
109 年度已有更新,建議修正。	版中更正。	
報告 P59 圖 3-1 結果「劣化類型」	影像沒有空間尺度資訊,無法使用劣化評	同意辦理
在套疊後可依報告P60劣化評等表	等表。使用深度學習模型可從前人完成的	
得知 DRU,為何要再訓練模型判斷	DRU 判識經驗來訓練模型。	
DRU? 請補充說明。		
是否可以配合簡易的測距儀,使影	第二年會使用攝影測量技術製作正射影	同意辦理
像可以有參考的尺寸,供後續劣化	像獲得實際尺寸。第一年使用的 TBMS2	
評等之用。	資料庫內的影像無距離資訊。	
十、臺灣無人機大聯盟:		
報告4.1.3節人工標注各式劣化區,	權重參數調整是目前普遍使用在深度學	同意辨理
在調整深度學習模型之權重參數	習模型上,此方法與 SMOTE 有相同效	
以克服模型訓練時資料數量不平	果,但不像 SMOTE 需額外重複取樣,此	
衡之問題,其權重參數調整是否為	外,SMOTE 也無法使用在這次的影像分	
普遍用來解決資料不平衡的方	割與辨識的任務上。。	
法?是否有使用案例?小類別樣		
本 增 生 技 術 (Synthetic minority		
over-sampling technique, SMOTE)		
是一般用來解決資料不平衡的方		
法之一,權重參數調整之優勢為何?		
報告 4.4 節 深度學習自動評定	E值由資料庫資料庫獲得,詳見1.3節。	同意辨理
DRU 值結果,其中模型輸入為原影		
像、所偵測之列化區域之線性組合		

以及 E 值;但於報告 P115 中提到		
拍攝距離之遠近將影像裂縫寬度		
大小之判定,請問團隊用於模型訓		
練以及推論時E值如何決定? 請補		
充說明。		
報告4.7 節無人機照相補光設計與	目前深度學習模型未來應用在無人機影	同意辦理
测試成果,此部分對於拍攝方式與	像上若有造成重大錯誤,就需要增加新的	
硬體規格有明確規範,特別是相鄰	訓練資料,並將目前模型訓練成果轉移到	
照片之重疊率在 60%~80%之間。但	新的訓練資料上做 Transfer Learning,以	
目前建立之 AI 辨識與 DRU 評定模	提升資料之多元性。	
型是以資料庫上之佐證照片進行		
訓練與驗證,與實際設計之光學取		
像機制不同,且照片重疊有機會能		
夠克服裂縫寬度判定問題。但目前		
建立之分析方法並非機於無人機		
實際取像資料,未來使用上這段差		
異如何克服?		
團隊使用的 AI 模型是根據資料庫	使用無人機高解析影像將可以提升辨識	同意辦理
資料庫的影像訓練,未來使用無人	裂縫的能力,但目前作法仍無法區分結構	
機標準化取像流程取得較高品質	與非結構裂縫,未來本研究會採用橋梁	
影像,是否可以解決目前辨識率不	3D 構件,並計算裂縫真實位置,以協助	
足、及無法區分結構性裂縫與否的	判識結構與非結構裂縫。	
問題? 請補充說明。		
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會		
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此	同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成	同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精	同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到 LED 補光,但仍建議在橋梁	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作	同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到 LED 補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需	同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到 LED 補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍	同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到 LED 補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍 要貼標準色板將會提升大量人工與成本。	同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到 LED 補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。 期末報告未提到橋梁鋪面、橋側與	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍 要貼標準色板將會提升大量人工與成本。 本案目前著重在其他六種構件,所以未探	同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到LED補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。 期末報告未提到橋梁鋪面、橋側與 橋墩掏刷等問題?建議可在無人	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍 要貼標準色板將會提升大量人工與成本。 本案目前著重在其他六種構件,所以未探 討橋梁鋪面與橋墩掏刷等部分之拍照與	同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到 LED 補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。 期末報告未提到橋梁鋪面、橋側與 橋墩掏刷等問題?建議可在無人 機上方與下方分別搭載鏡頭,以便	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍 要貼標準色板將會提升大量人工與成本。 本案目前著重在其他六種構件,所以未探 討橋梁鋪面與橋墩掏刷等部分之拍照與 劣化偵測。本案所開發之 Y6 無人機,有	同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到LED補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。 期末報告未提到橋梁鋪面、橋側與 橋墩掏刷等問題?建議可在無人 機上方與下方分別搭載鏡頭,以便 拍攝這些部位。	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍 要貼標準色板將會提升大量人工與成本。 本案目前著重在其他六種構件,所以未探 討橋梁鋪面與橋墩掏刷等部分之拍照與 劣化偵測。本案所開發之 Y6 無人機,有 180 度上下旋轉的雲台,因此使用一台相	同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到 LED 補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。 期末報告未提到橋梁鋪面、橋側與 橋墩掏刷等問題?建議可在無人 機上方與下方分別搭載鏡頭,以便 拍攝這些部位。	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍 要貼標準色板將會提升大量人工與成本。 本案目前著重在其他六種構件,所以未探 討橋梁鋪面與橋墩掏刷等部分之拍照與 劣化偵測。本案所開發之 Y6 無人機,有 180 度上下旋轉的雲台,因此使用一台相 機,即可拍攝這些部位。	同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到LED補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。 期末報告未提到橋梁鋪面、橋側與 橋墩掏刷等問題?建議可在無人 機上方與下方分別搭載鏡頭,以便 拍攝這些部位。 本案使用 Autel 無人機拍攝影像進	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍 要貼標準色板將會提升大量人工與成本。 本案目前著重在其他六種構件,所以未探 討橋梁鋪面與橋墩掏刷等部分之拍照與 劣化偵測。本案所開發之 Y6 無人機,有 180 度上下旋轉的雲台,因此使用一台相 機,即可拍攝這些部位。 經本案實際測試,製作橋梁 3D 模型沒有	同意辦理 同意辦理 同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到 LED 補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。 期末報告未提到橋梁鋪面、橋側與 橋墩掏刷等問題?建議可在無人 機上方與下方分別搭載鏡頭,以便 拍攝這些部位。 本案使用 Autel 無人機拍攝影像進 行 3D 建模,但此無人機無法關掉	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍 要貼標準色板將會提升大量人工與成本。 本案目前著重在其他六種構件,所以未探 討橋梁鋪面與橋墩掏刷等部分之拍照與 劣化偵測。本案所開發之 Y6 無人機,有 180 度上下旋轉的雲台,因此使用一台相 機,即可拍攝這些部位。 經本案實際測試,製作橋梁 3D 模型沒有 問題。	同意辦理 同意辦理 同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到LED補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。 期末報告未提到橋梁鋪面、橋側與 橋墩掏刷等問題?建議可在無人 機上方與下方分別搭載鏡頭,以便 拍攝這些部位。 本案使用 Autel 無人機拍攝影像進 行 3D 建模,但此無人機無法關掉 防震的功能,所以拍攝之影像與所	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍 要貼標準色板將會提升大量人工與成本。 本案目前著重在其他六種構件,所以未探 討橋梁鋪面與橋墩掏刷等部分之拍照與 劣化偵測。本案所開發之 Y6 無人機,有 180 度上下旋轉的雲台,因此使用一台相 機,即可拍攝這些部位。 經本案實際測試,製作橋梁 3D 模型沒有 問題。	同意辦理 同意辦理 同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到 LED 補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。 期末報告未提到橋梁鋪面、橋側與 橋墩掏刷等問題?建議可在無人 機上方與下方分別搭載鏡頭,以便 拍攝這些部位。 本案使用 Autel 無人機拍攝影像進 防震的功能,所以拍攝之影像與所 建置之模型可能會有問題。	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍 要貼標準色板將會提升大量人工與成本。 本案目前著重在其他六種構件,所以未探 討橋梁鋪面與橋墩掏刷等部分之拍照與 劣化偵測。本案所開發之 Y6 無人機,有 180 度上下旋轉的雲台,因此使用一台相 機,即可拍攝這些部位。 經本案實際測試,製作橋梁 3D 模型沒有 問題。	同意辦理 同意辦理 同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判識是否會造成影響?本研究 有提到 LED 補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。 期末報告未提到橋梁鋪面、橋側與 橋墩掏刷等問題?建議可在無人 機上方與下方分別搭載鏡頭,以便 拍攝這些部位。 本案使用 Autel 無人機拍攝影像進 行 3D 建模,但此無人機無法關掉 防震的功能,所以拍攝之影像與所 建置之模型可能會有問題。 本案不適合自行開發 3D 建模軟	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍 要貼標準色板將會提升大量人工與成本。 本案目前著重在其他六種構件,所以未探 討橋梁鋪面與橋墩掏刷等部分之拍照與 劣化偵測。本案所開發之 Y6 無人機,有 180 度上下旋轉的雲台,因此使用一台相 機,即可拍攝這些部位。 經本案實際測試,製作橋梁 3D 模型沒有 問題。 本案並未開發 3D 建模軟體,而 Metashape	同意辦理         同意辦理         同意辦理         同意辦理         同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 鏡頭、時間等因素對拍攝成 約色調會有影響,對深度學習劣 化判調 LED 補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。 期末報告未提到橋梁鋪面、橋側與 橋墩上方與下方分別搭載鏡頭,以便 拍攝這些部位。 本案使用 Autel 無人機拍攝影像進 防震的功能,所以拍攝之影像與所 建置之模型可能會有問題。 本案不適合自行開發 3D 建模軟 體,因研發費用會很可觀,建議應	<ul> <li>色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍 要貼標準色板將會提升大量人工與成本。</li> <li>本案目前著重在其他六種構件,所以未探 討橋梁鋪面與橋墩掏刷等部分之拍照與 劣化偵測。本案所開發之 Y6 無人機,有 180 度上下旋轉的雲台,因此使用一台相 機,即可拍攝這些部位。</li> <li>經本案實際測試,製作橋梁 3D 模型沒有 問題。</li> <li>本案並未開發 3D 建模軟體,而 Metashape 與 SketchUP 軟體都是單機版,沒有資安</li> </ul>	同意辦理         同意辦理         同意辦理         同意辦理         同意辦理
問題?請補充說明。 十一、台灣無人機發展應用協會 光源、鏡頭、時間等因素對拍攝成 果的色調會有影響,對深度學習劣 化判調會有影響,對深度學習劣 化判調是否會造成影響?本研究 有提到 LED 補光,但仍建議在橋梁 表面放置標準色版當作基準去修 正影像的色調。 期末報告未提到橋梁鋪面、橋側與 橋墩局等問題?建議或可在無人 機指攝影像進 拍攝這些部位。 本案使用 Autel 無人機拍攝影像進 行 3D 建模, 但此無人機無法關掉 防震的功能,所以拍攝之影像與所 建置之模型可能會有問題。 本案不適合自行開發 3D 建模軟 體,因研發費用會很可觀,建議應 使用 NCC 認證過的 3D 建模軟體。	色調會影響深度學習劣化判識成果,因此 需要 LED 補光,若經常發現錯誤偵測成 果,就需補充訓練資料,提升模型辨識精 度。至於放置標準色板於橋梁表面的作 法,表示此處人員容易到達,也許就不需 使用無人機拍攝。而若人員不易到達卻仍 要貼標準色板將會提升大量人工與成本。 本案目前著重在其他六種構件,所以未探 討橋梁鋪面與橋墩掏刷等部分之拍照與 劣化偵測。本案所開發之 Y6 無人機,有 180 度上下旋轉的雲台,因此使用一台相 機,即可拍攝這些部位。 經本案實際測試,製作橋梁 3D 模型沒有 問題。 本案並未開發 3D 建模軟體,而 Metashape 與 SketchUP 軟體都是單機版,沒有資安 問題。	同意辦理         同意辦理         同意辦理         同意辦理         同意辦理

各式橋梁劣化類型,尤其對於劣化	但會降低空間解析度,導致降低細微劣化	
類型銹蝕會有助益。	(裂縫)的辨識成果。	
無人機抗風能力與穩定能力要夠,	本案所開發之 Y6 無人抗風係數約 5 級,	同意辨理
以避免橋梁附近環境所造成的擾	實際作業時仍需由現場操作人員研判現	
流效應。	場天候與風速是否安全,才能進行航拍作	
	業。	
十二、韓仁毓委員(書面意見):		
DRU 值之評定需要多少張照片?	計畫要求第一年以TMBS2 資料庫內資料	同意辦理
一座橋梁各需要多少張照片?會	進行 AI 模型訓練與驗證,所以是一張照	
算出幾個 DRU 值?(從報告書上	片即判定一個 DRU 值, 第二年則是使用	
所呈現似乎是一張照片即判定一	UAV 影像製作正射影像,改為判定一個	
個 DRU 值,顯與目前橋梁安全評	構件 DERU 值。	
估程序不符)。		
在判定步驟上先由 DER 值再決定	目前規範即是以質化判別 DRU 值,因此	同意辨理
U值,目前E值並不在自動評定範	不須先判斷 E 值, 而 E 值則是量測劣化	
圍內,U值如何能自動獲得?請補	範圍,目前 U 值是由深度學習依據規範	
充說明。	推估模型獲得。	
DERU 四者為連動關係,單純將之	本研究進行中已召開橋梁專家學者諮詢	同意辦理
以 AI 模型訓練而忽略其物理意涵	會議,同時針對 DRU 值之判斷訂定準則	
與關聯性,其成果之判釋需格外小	供 AI 模型訓練,後續實橋驗證亦會與橋	
心。請務必諮詢真正有橋檢實務經	管機關共同合作。	
驗的專家,以確保成果能獲得認可		
並落地應用。		
報告 P97 提到 UWB 與 GNSS 噪聲	TTO U IT & D - THE OOD II	
	VIO 的頻率 或高可達 200 HZ。	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前	VIO的頻率敢高可達 200 Hz。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的	同意辨理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻	VIO 的頻率嵌高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高	VIO 的頻率最高可達 200 Hz。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位	VIO 的頻率敢高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受	VIO 的頻率最高可達 200 Hz。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 的差距可能達到公尺級別,且容易受到環	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算	VIO 的頻率敢高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 的差距可能達到公尺級別,且容易受到環 境干擾,故需要與其他感測器資訊進行融	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算 單元,耗電量高。	VIO 的頻率最高可達 200 Hz。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 的差距可能達到公尺級別,且容易受到環 境干擾,故需要與其他感測器資訊進行融 合。在橋梁底下將失去 GNSS,因此單靠	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算 單元,耗電量高。	VIO 的頻率敢高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 的差距可能達到公尺級別,且容易受到環 境干擾,故需要與其他感測器資訊進行融 合。在橋梁底下將失去 GNSS,因此單靠 GNSS 並無法達成無人機自主飛行的目	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算 單元,耗電量高。	VIO 的頻率最高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 的差距可能達到公尺級別,且容易受到環 境干擾,故需要與其他感測器資訊進行融 合。在橋梁底下將失去 GNSS,因此單靠 GNSS 並無法達成無人機自主飛行的目 的。經測試比較,VIO、IMU、UWB(及	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算 單元,耗電量高。	VIO 的頻率敢高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 的差距可能達到公尺級別,且容易受到環 境干擾,故需要與其他感測器資訊進行融 合。在橋梁底下將失去 GNSS,因此單靠 GNSS 並無法達成無人機自主飛行的目 的。經測試比較,VIO、IMU、UWB (及 GNSS)的融合演算法能得到最佳定位結	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算 單元,耗電量高。	VIO 的頻率敢高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 的差距可能達到公尺級別,且容易受到環 境干擾,故需要與其他感測器資訊進行融 合。在橋梁底下將失去 GNSS,因此單靠 GNSS 並無法達成無人機自主飛行的目 的。經測試比較,VIO、IMU、UWB (及 GNSS)的融合演算法能得到最佳定位結 果,比單獨使用任何一種方式為佳。	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算 單元,耗電量高。 報告 P97 使用 8 個 UWB 固定站的	VIO 的頻率敢高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 的差距可能達到公尺級別,且容易受到環 境干擾,故需要與其他感測器資訊進行融 合。在橋梁底下將失去 GNSS,因此單靠 GNSS 並無法達成無人機自主飛行的目 的。經測試比較,VIO、IMU、UWB (及 GNSS)的融合演算法能得到最佳定位結 果,比單獨使用任何一種方式為佳。 由於 UWB 會受到橋墩干擾造成訊號遮	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算 單元,耗電量高。 報告 P97 使用 8 個 UWB 固定站的 理由亦為錯誤,在橋外已有 GNSS	VIO 的頻率敢高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 的差距可能達到公尺級別,且容易受到環 境干擾,故需要與其他感測器資訊進行融 合。在橋梁底下將失去 GNSS,因此單靠 GNSS 並無法達成無人機自主飛行的目 的。經測試比較,VIO、IMU、UWB (及 GNSS)的融合演算法能得到最佳定位結 果,比單獨使用任何一種方式為佳。 由於 UWB 會受到橋墩干擾造成訊號遮 蔽,所以在每一跨會配置 4 個 UWB 進行	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算 單元,耗電量高。 報告 P97 使用 8 個 UWB 固定站的 理由亦為錯誤,在橋外已有 GNSS 訊號,即使要轉換至全域坐標,亦	VIO 的頻率敢高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 的差距可能達到公尺級別,且容易受到環 境干擾,故需要與其他感測器資訊進行融 合。在橋梁底下將失去 GNSS,因此單靠 GNSS 並無法達成無人機自主飛行的目 的。經測試比較,VIO、IMU、UWB (及 GNSS)的融合演算法能得到最佳定位結 果,比單獨使用任何一種方式為佳。 由於 UWB 會受到橋墩干擾造成訊號遮 蔽,所以在每一跨會配置 4 個 UWB 進行 定位。使用 8 組 UWB 基站是因為在進行	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算 單元,耗電量高。 報告 P97 使用 8 個 UWB 固定站的 理由亦為錯誤,在橋外已有 GNSS 訊號,即使要轉換至全域坐標,亦 無須額外 4 組 UWB 固定站。	VIO 的頻率敢高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 的差距可能達到公尺級別,且容易受到環 槍干擾,故需要與其他感測器資訊進行融 合。在橋梁底下將失去 GNSS,因此單靠 GNSS 並無法達成無人機自主飛行的目 的。經測試比較,VIO、IMU、UWB (及 GNSS)的融合演算法能得到最佳定位結 果,比單獨使用任何一種方式為佳。 由於 UWB 會受到橋墩干擾造成訊號遮 蔽,所以在每一跨會配置 4 個 UWB 進行 定位。使用 8 組 UWB 基站是因為在進行	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算 單元,耗電量高。 報告 P97 使用 8 個 UWB 固定站的 理由亦為錯誤,在橋外已有 GNSS 訊號,即使要轉換至全域坐標,亦 無須額外 4 組 UWB 固定站。	VIO 的頻率敢高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 說的誤了能達到公尺級別,且容易受到環 境干擾,故需要與其他感測器資訊進行離 合。在橋梁底下將失去 GNSS,因此單靠 GNSS 並無法達成無人機自主飛行的目 的。經測試比較,VIO、IMU、UWB (及 GNSS)的融合演算法能得到最佳定位結 果,比單獨使用任何一種方式為佳。 由於 UWB 會受到橋墩干擾造成訊號遮 蔽,所以在每一跨會配置 4 個 UWB 進行 定位。使用 8 組 UWB 基站是因為在進行 橋墩環繞拍照作業時,飛行路線會經過2 跨,所以才會需要 8 個 UWB 基站,以利	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算 單元,耗電量高。 報告 P97 使用 8 個 UWB 固定站的 理由亦為錯誤,在橋外已有 GNSS 訊號,即使要轉換至全域坐標,亦 無須額外 4 組 UWB 固定站。	VIO 的頻率敢高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 的差距可能達到公尺級別,且容易受到環 前手擾,故需要與其他感測器資訊進行 情,故需要與其他感測器資訊進單 合。在橋梁底下將失去 GNSS,因此單靠 GNSS 並無法達成無人機自主飛行的目 的。經測試比較,VIO、IMU、UWB (及 GNSS)的融合演算法能得到最佳定位結 果,比單獨使用任何一種方式為佳。 由於 UWB 會受到橋墩干擾造成訊號遮 蔽,所以在每一跨會配置 4 個 UWB 進行 定位。使用 8 組 UWB 基站是因為在進行 驚頻拍照作業時,飛行路線會經過 2 跨,所以才會需要 8 個 UWB 基站,以利 無人機在不同跨之間環繞飛行作業時,可	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算 單元,耗電量高。 報告 P97 使用 8 個 UWB 固定站的 理由亦為錯誤,在橋外已有 GNSS 訊號,即使要轉換至全域坐標,亦 無須額外 4 組 UWB 固定站。	VIO 的頻率敢高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤差在實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的誤差,但其結果跳動較大,正負之間 線的差距可能達到公尺級別,且容易受到環 境干擾,故需要與其他感測器資訊進行副 槍一種橋梁底下將失去 GNSS,因此單靠 GNSS 並無法達成無人機自主飛行的目 的。經測試比較,VIO、IMU、UWB (及 GNSS)的融合演算法能得到最佳定位結 果,比單獨使用任何一種方式為佳。 由於 UWB 會受到橋墩干擾造成訊號遮 蔽,所以在每一跨會配置 4 個 UWB 進行 定位壞燒拍照作業時,飛行路線會經過 2 跨,所以才會需要 8 個 UWB 基站,以利 無人機在不同跨之間環繞飛行作業時,可 以避免在另一跨會因橋墩會對 UWB 信號	同意辦理
大、頻率低,此為錯誤論述。目前 這兩項技術皆可達到 30Hz 以上頻 率(遠比團隊所提 VIO 頻率來得高 且無須高度運算負擔),即時定位 精度亦可達公寸等級。而 VIO 則受 限於現場光線條件,且需較強運算 單元,耗電量高。 報告 P97 使用 8 個 UWB 固定站的 理由亦為錯誤,在橋外已有 GNSS 訊號,即使要轉換至全域坐標,亦 無須額外 4 組 UWB 固定站。	VIO 的頻率敢高可達 200 HZ。 此處說明的噪聲(noise)是指估計結果的 平滑程度,並非平均誤差。UWB 的定位 誤產實際飛行測試時,雖能達到公寸等 級的差距,但其結果跳動較大,正負負到 說明的重調。 該是了能 要與其他感別,且容易受到環 時,故需要與其他感別,且容易受到環 奇。在橋梁底下將失去 GNSS,因此單 合。在橋梁底下將失去 GNSS,因此單 合。經測試比較,VIO、IMU、UWB (及 GNSS)的融合演算法能得到最佳定位結 果,比單獨使用任何一種方式為佳。 由於 UWB 會受到橋墩干擾造成訊號遮 蔽,所以在每一跨會配置 4 個 UWB 進行 定位壞境拍照作業時,飛行路線會經過 2 時,所以才會需要 8 個 UWB 基站,以利 無人機在不同跨會因橋墩會對 UWB 這行 橋墩電鏡和照作業時,就行作業時,可 以避免在另一跨會因橋墩會對 UWB 信號	同意辦理

	標轉換。	
本研究採 VIO 為融合定位之技術	此定位技術不需提前對於橋梁進行建模。	同意辦理
之一,請說明採此方法是否需進行	本案建置之橋梁 3D 模型有兩種,一種為	
橋梁建模?該法對於現場環境變	仿真模型,另一種為物件化模型。若橋梁	
化(如植生改變或光線條件變化)	沒有嚴重變形或破壞,原則上僅需進行一	
之穩定性為何?另橋梁建模所需	次的 3D 建模。由於建置物件化 3D 模型	
衍生之額外成本與模型更新頻率,	會增加較多人力與成本,但也多了許多優	
亦請說明。若此技術要大規模落地	點,例如可以製作正射影像,進行多時期	
實施,是否代表所有橋梁均需先建	的變異偵測,也就是劣化區的惡化分析,	
模且定期更新? 請補充說明。	因此建議針對比較重要(人車通過的頻率	
	高、橋梁夠高且人員無法直接目視檢測)	
	的橋梁才需建置物件化 3D 模型。但若僅	
	需進行快篩,又要無人機自主飛行,則僅	
	需製作仿真 3D 模型即可。	
如前意見,本研究忽略 DERU 之重	目前規範即是以質化判別 DRU 值,因此	同意辦理
要指標 E (extend),以此得出之橋	不須先判斷 E 值, 而 E 值則是量測劣化	
梁安全評估結果如何說服橋梁結	範圍。目前第一年計畫要求為使用	
構專家?報告 P122 談到 E 值為輸	TMBS2 資料庫,因單張影像無法正確獲	
入值,該輸入值如何自動化獲得?	得 E 值,故使用 TBMS2 資料庫內影像的	
(對應 P187, E 值需要現場人員判	E 值為輸入值。未來採用無人機拍攝時,	
斷,大大減損採 UAV 及 AI 進行橋	影像數量大,將不再採用單張影像推估	
檢之效益)。	DRU,而是結合構件 3D 模型研判 DERU	
	值,詳見1.3節。	
橋下定位系統,目前測試僅為坐標	相關數據皆為將融合 VIO+ UWB+ RTK	同意辦理
求解之定位成果,然如何自動化導	與 IMU 之定位結果,再輸入飛控系統進	
控才是重點。請說明目前團隊是否	行自動導控飛行而蒐集之資料。至於自動	
已能將 VIO、GNSS、UWB 以及 INS	導控之絕對定位精度測試,是將融合定位	
等單元資料融合後,合成穩定的全	結果(移除 GNSS 訊號)跟真值(RTK 定位	
域坐標並即時輸入至 UAV 之導控	數值)相比計算而得,詳見4.10.3。	
系統進行自動導控飛行?若是融		
合定位技術之延時與導控精度各		
是多少? 請補充說明。		
請說明本案所使用之UWB 硬體型	目前融合 VIO+ UWB+ RTK 與 IMU 之定	同意辦理
號、規格與產地?並請說明所採用	位技術評估是可行,測試過程中曾使用的	
之 UWB 定位邏輯為何(TOA、	是 Nooploop LinkTrack P(中國)及 Pozyx	
TDOA 或其它)?使用之發射器有	(比利時),其定位邏輯為 TOA,有效距離	
效距離為何?報告 P157 之測試距	分別為 100 公尺及 400 ~ 800 m <sup>2</sup> 。未來	
離僅為10公尺,案例過於簡單,是	會針對其他相同設備進行評估與測試,包	
合能適用於實際橋檢環境? 請補充	括 iWave (台灣)、創鈺(台灣)、TDSR (美	
說明。	國)、BeSpoon(法國),以提供最佳方案。	
	關於 P157 之測試由於場地限制及當時算	
	法仍在测试階段,基於安全考量僅先测试	
	10 公尺的距離。但此實驗為前後移動 5	
	趟,故無人機移動之距離實際為90公尺。	

	此測試是為了表達本融合算法並不會因	
	為移動距離的增加而導致誤差增加。	
書面報告中「座標」請修正為「坐	已修正。	同意辦理
標」、「橋樑」請修正為「橋梁」,以		
上均為專業領域之正確用詞。		
報告 P181 團隊回復說無須進行橋	關於橋梁構件類型自動辨識問題,經3月	同意辦理
梁構件辨識,理由為資料庫中已有	份的工作會議討論,已確認構件辨識係依	
此資料。但此案目標並不只是使用	無人機飛行路徑,並於拍攝時同時將影像	
現有資料庫資料,而是希望藉由現	檔案結合構件編號及位置,如此可對應最	
有資料庫影像訓練出合適的 AI 模	精準之構件名稱。	
型,作為後續橋梁檢測之用。故未		
來實用時仍須對橋梁構件進行辨		
識,為不可迴避之問題。		
本案執行團隊確依各項規劃工作	感謝委員之建議,後續將與橋管機關合	同意辦理
進行,除符合合約規定外,團隊更	作,並進行實橋驗證,同時相關軟硬體設	
應考量技術實際落地實行之可行	備將配合政府規定辦理。	
性,除考量在成本、實務操作上之		
可行性,並確保成果能獲得第一線		
執行者與橋檢專業人員之認同。		
另,所使用之硬體設備請務必確保		
排除紅色供應鏈,以免除資安疑		
<b>皮</b> 。		
/思 °		
一思。 一日本書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書書	 見)	
ℝ <sup>0</sup> <b>十三、臺中市養護工程處(書面意</b> 報告 P143 目前研究所需 UAV 市面	見) 本案設計之 Y6 無人機可在市場上找到,	同意辦理
一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	見) 本案設計之 Y6 無人機可在市場上找到, 但即使不使用 Y6 之造型,亦可使用常見	同意辨理
應。 十三、臺中市養護工程處(書面意 報告 P143 目前研究所需 UAV 市面 上無通用機型,未來推廣方式如何 處理?費用為何?請補充說明。	見) 本案設計之Y6 無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6 之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時,	同意辨理
<b>十三、臺中市養護工程處(書面意</b> 報告 P143 目前研究所需 UAV 市面 上無通用機型,未來推廣方式如何 處理?費用為何?請補充說明。	見) 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分,	同意辨理
唐 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	見) 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達	同意辨理
<b>十三、臺中市養護工程處(書面意</b> 報告 P143 目前研究所需 UAV 市面 上無通用機型,未來推廣方式如何 處理?費用為何?請補充說明。	見) 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費	同意辦理
唐 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	見) 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費 用。	同意辦理
他 中三、臺中市養護工程處(書面意 報告 P143 目前研究所需 UAV 市面 上無通用機型,未來推廣方式如何 處理?費用為何?請補充說明。 報告 P147 近年來對於 UAV 操作技	見) 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費 用。 在山區最容易受影響的訊號為GPS訊號,	同意辦理
他。 十三、臺中市養護工程處(書面意報告 P143 目前研究所需 UAV 市面上無通用機型,未來推廣方式如何處理?費用為何?請補充說明。 報告 P147 近年來對於 UAV 操作技術雖日趨成熟,但定位技術仍是影	見) 本案設計之Y6 無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6 之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費 用。 在山區最容易受影響的訊號為GPS 訊號, 本研究目前提出的GRVINS 緊耦合視覺	同意辦理
他。 十三、臺中市養護工程處(書面意報告 P143 目前研究所需 UAV 市面上無通用機型,未來推廣方式如何處理?費用為何?請補充說明。 報告 P147 近年來對於 UAV 操作技術雖日趨成熟,但定位技術仍是影響整體作業成果最關鍵之處,本研	見) 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費 用。 在山區最容易受影響的訊號為GPS訊號, 本研究目前提出的GRVINS 緊耦合視覺 定位融合演算法,即是針對GNSS 訊號不	同意辦理
他。 十三、臺中市養護工程處(書面意報告 P143 目前研究所需 UAV 市面上無通用機型,未來推廣方式如何處理?費用為何?請補充說明。 報告 P147 近年來對於 UAV 操作技術雖日趨成熟,但定位技術仍是影響整體作業成果最關鍵之處,本研究測試實驗地點大多為空曠地區,	見) 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費 用。 在山區最容易受影響的訊號為GPS訊號, 本研究目前提出的GRVINS 緊耦合視覺 定位融合演算法,即是針對GNSS 訊號不 佳的橋下的定位解決方案。目前在實驗地	同意辦理
他。 十三、臺中市養護工程處(書面意報告 P143 目前研究所需 UAV 市面上無通用機型,未來推廣方式如何處理?費用為何?請補充說明。 報告 P147 近年來對於 UAV 操作技術雖日趨成熟,但定位技術仍是影響整體作業成果最關鍵之處,本研究測試實驗地點大多為空曠地區, 日後如進入山區是否有克服訊號	見) 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費 用。 在山區最容易受影響的訊號為GPS訊號, 本研究目前提出的GRVINS 緊耦合視覺 定位融合演算法,即是針對GNSS訊號不 佳的橋下的定位解決方案。目前在實驗地 點的測試,皆是將 RTK GNSS 做為地真	同意辦理
應。 十三、臺中市養護工程處(書面意 報告 P143 目前研究所需 UAV 市面 上無通用機型,未來推廣方式如何 處理?費用為何?請補充說明。 報告 P147 近年來對於 UAV 操作技 術雖日趨成熟,但定位技術仍是影 響整體作業成果最關鍵之處,本研 究測試實驗地點大多為空曠地區, 日後如進入山區是否有克服訊號 接收不良的方案。	見 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費 用。 在山區最容易受影響的訊號為GPS訊號, 本研究目前提出的GRVINS 緊耦合視覺 定位融合演算法,即是針對GNSS 訊號不 佳的橋下的定位解決方案。目前在實驗地 點的測試,皆是將 RTK GNSS 做為地真 資料用來比對定位準確率,並未將其納入	同意辦理
應。 十三、臺中市養護工程處(書面意 報告 P143 目前研究所需 UAV 市面 上無通用機型,未來推廣方式如何 處理?費用為何?請補充說明。 報告 P147 近年來對於 UAV 操作技 術雖日趨成熟,但定位技術仍是影 響整體作業成果最關鍵之處,本研 究測試實驗地點大多為空曠地區, 日後如進入山區是否有克服訊號 接收不良的方案。	見) 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費 用。 在山區最容易受影響的訊號為GPS訊號, 本研究目前提出的GRVINS 緊耦合視覺 定位融合演算法,即是針對GNSS訊號不 佳的橋下的定位解決方案。目前在實驗地 點的測試,皆是將 RTK GNSS 做為地真 資料用來比對定位準確率,並未將其納入 融合演算法中。所以在訊號接收不良的山	同意辦理
應。 十三、臺中市養護工程處(書面意 報告 P143 目前研究所需 UAV 市面 上無通用機型,未來推廣方式如何 處理?費用為何?請補充說明。 報告 P147 近年來對於 UAV 操作技 術雖日趨成熟,但定位技術仍是影 響整體作業成果最關鍵之處,本研 究測試實驗地點大多為空曠地區, 日後如進入山區是否有克服訊號 接收不良的方案。	見) 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費 店。 在山區最容易受影響的訊號為GPS訊號, 本研究目前提出的GRVINS 緊耦合視覺 定位融合演算法,即是針對GNSS 訊號不 佳的橋下的定位解決方案。目前在實驗地 點的測試,皆是將 RTK GNSS 做為地真 資料用來比對定位準確率,並未將其納入 融合演算法中。所以在訊號接收不良的山 區,亦將能正常工作,提供無人機所需的	同意辦理
應。 十三、臺中市養護工程處(書面意 報告 P143 目前研究所需 UAV 市面 上無通用機型,未來推廣方式如何 處理?費用為何?請補充說明。 報告 P147 近年來對於 UAV 操作技 術雖日趨成熟,但定位技術仍是影 響整體作業成果最關鍵之處,本研 究測試實驗地點大多為空曠地區, 日後如進入山區是否有克服訊號 接收不良的方案。	見) 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費 。 在山區最容易受影響的訊號為GPS訊號, 本研究目前提出的GRVINS 緊耦合視覺 定位融合演算法,即是針對GNSS訊號不 佳的橋下的定位解決方案。目前在實驗地 點的測試,皆是將RTK GNSS 做為地真 資料用來比對定位準確率,並未將其納入 融合演算法中。所以在訊號接收不良的山 區,亦將能正常工作,提供無人機所需的 定位成果。	同意辦理
應。 十三、臺中市養護工程處(書面意 報告 P143 目前研究所需 UAV 市面 上無通用機型,未來推廣方式如何 處理?費用為何?請補充說明。 報告 P147 近年來對於 UAV 操作技 術雖日趨成熟,但定位技術仍是影 響整體作業成果最關鍵之處,本研 究測試實驗地點大多為空曠地區, 日後如進入山區是否有克服訊號 接收不良的方案。	見 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費 ,故目前還無法估算相關費 , 在山區最容易受影響的訊號為GPS訊號, 本研究目前提出的GRVINS 緊耦合視覺 定位融合演算法,即是針對GNSS 訊號不 佳的測試,皆是將 RTK GNSS 做為地真 資料用來比對定位準確率,並未將其納入 融合演算法中。所以在訊號接收不良的山 區,亦將能正常工作,提供無人機所需的 定位成果。	同意辦理 同意辦理 同意辦理
應。 十三、臺中市養護工程處(書面意 報告 P143 目前研究所需 UAV 市面 上無通用機型,未來推廣方式如何 處理?費用為何?請補充說明。 報告 P147 近年來對於 UAV 操作技 術雖日趨成熟,但定位技術仍是影 響整體作業成果最關鍵之處,本研 究測試實驗地點大多為空曠地區, 日後如進入山區是否有克服訊號 接收不良的方案。 報告 P171 製作橋梁檢測報告需使 用 AI-IBBIS 之授權軟體,且操作人	<b>見</b> 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費   在山區最容易受影響的訊號為GPS訊號, 本研究目前提出的GRVINS緊耦合視覺 定位融合演算法,即是針對GNSS訊號不 佳的約測試,皆是將RTKGNSS做為地真 資料用來比對定位準確率,並未將其納入 融合演算法中。所以在訊號接收不良的山 區,亦將能正常工作,提供無人機所需的 定位成果。   此軟體未來將免費提供給所有橋梁管理 機關與橋檢顧問公司,類似現行資料庫的	同意辦理 同意辦理 同意辦理
應。 十三、臺中市養護工程處(書面意 報告 P143 目前研究所需 UAV 市面 上無通用機型,未來推廣方式如何 處理?費用為何?請補充說明。 報告 P147 近年來對於 UAV 操作技 術雖日趨成熟,但定位技術仍是影 響整體作業成果最關鍵之處,本研 究測試實驗地點大多為空曠地區, 日後如進入山區是否有克服訊號 接收不良的方案。 報告 P171 製作橋梁檢測報告需使 用 AI-IBBIS 之授權軟體,且操作人 員需經訓練,對機關辦理招標作	見 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費 , 故目前還無法估算相關費 , 故目前還無法估算相關費 , 本研究目前提出的GRVINS緊耦合視覺 定位融合演算法,即是針對GNSS訊號, 本研究目前提出的GRVINS緊耦合視覺 定位離合演算法,即是針對GNSS訊號不 佳的約測試,皆是將RTKGNSS做為地真 資料用來比對定位準確率,並未將其納入 融合演算法中。所以在訊號接收不良的山 區,亦將能正常工作,提供無人機所需的 定位成果。 此軟體未來將免費提供給所有橋梁管理 機關與橋檢顧問公司,類似現行資料庫的 APP。	同意辦理 同意辦理 同意辦理
應。 十三、臺中市養護工程處(書面意 報告 P143 目前研究所需 UAV 市面 上無通用機型,未來推廣方式如何 處理?費用為何?請補充說明。 報告 P147 近年來對於 UAV 操作技 術雖日趨成熟,但定位技術仍是影 響整體作業成果最關鍵之處,本研 究測試實驗地點大多為空曠地區, 日後如進入山區是否有克服訊號 接收不良的方案。 報告 P171 製作橋梁檢測報告需使 用 AI-IBBIS 之授權軟體,且操作人 員需經訓練,對機關辦理招標作 業,於設定投標廠商資格時,恐有	<b>見</b> 本案設計之Y6無人機可在市場上找到, 但即使不使用Y6之造型,亦可使用常見 的多軸無人機,只是在拍攝橋梁河床時, 照相機要改裝在無人機下方。費用部分, 因本案仍在進行許多測試與實驗,尚未達 到量產階段,故目前還無法估算相關費 用。 在山區最容易受影響的訊號為GPS訊號, 本研究目前提出的GRVINS緊耦合視覺 定位融合演算法,即是針對GNSS訊號不 佳的橋下的定位解決方案。目前在實驗地 點的測試,皆是將RTK GNSS 做為地真 資料用來比對定位準確率,並未將其納入 融合演算法中。所以在訊號接收不良的山 區,亦將能正常工作,提供無人機所需的 定位成果。 此軟體未來將免費提供給所有橋梁管理 機關與橋檢顧問公司,類似現行資料庫的 APP。	同意辦理 同意辦理 同意辦理

十四、苗栗縣政府(書面意見)		
深度學習的準確率如何改善提升,	第一年所使用的深度學習模型辨識正確	同意辨理
以利 112 年的計畫執行效果更佳,	率已比其他模型表現更好,第二年團隊繼	
請補充說明。	續從模型設計與資料端持續改善。	
DRU 的深度學習為國內尚未有的	同意,謝謝委員的建議。	同意辦理
研究,可訂定滾動式階段目標並持		
續研究,以提供橋梁管理機關做為		
品質查核之用。		
有關無人機的操作流程、軌跡與飛	整體測試作業較完備後,將彙整無人機拍	同意辦理
行條件需詳細規劃,以利增進 112	攝的標準作業流程、執行條件及規格需	
年計畫成效。	求,以利後續其他團隊應用此技術進行橋	
	梁巡檢,並增進該技術的作業成效。	
十五、港研中心(書面意見):		
報告P76制定橋梁各構件拍攝作業	本案規劃設計之 Y6 無人機為了搭載高解	同意辦理
標準,已將大梁、橫隔梁與橋面板	析相機,導致體型較大無法拍攝到支承,	
底部、兩大梁間大梁側邊、橫隔梁	未來會建議廠商研發小型無人機,以彌補	
側邊、橋梁兩側大梁側邊與橋面板	大型無人機的缺陷。	
下方、帽梁與橋墩等構件作業方式		
進行規劃,受限於無人機飛行空間		
限制,對於支承之影像取得並未予		
規劃,其因應方案為何?請補充說		
明。		
報告P91本研究成果已提出單一構	感謝委員的建議。	同意辨理
件或部分區域之飛航路徑規劃之		
成果,此為一便利且實用之功能,		
可降低使用者之操作門檻,並可穩		
定影像品質,後續建議可朝影像重		
疊率不足、拍攝距離過遠致相片解		
析度不足、入射角過大等會影響成		
果品質之因素進行示警功能開發。		
十六、運工組(書面意見):		
期末報告書的撰寫格式需符合運	遵照辦理	同意辦理
研所出版品規範,後續請一併修		
正。		
有關報告第51~56頁將國內相關單	遵照辦理	同意辦理
位成果呈現比較,建議是否刪除相		
關單位名稱,避免造成相關單位困		
擾。		
報告第 56 頁中有關需製作物件化	物件化橋梁 3D 模型除了帶有屬性資訊	同意辨理
橋梁三維模型與矩形框,其中矩形	(例如拍攝之橋梁構件名稱),同時還包括	
框用途為何,建議補充說明。	幾何資訊,也就是每個矩形框各個角點的	
	3D 坐標,故可以協助校正影像成為正射	
	影像,並在正射影像上偵測裂縫等,以計	

	算劣化區之 3D 坐標,並與橋梁 3D 模型	
	套疊瀏覽,如1.3節中圖1-3範例所示。	
報告已有文獻回顧相關影像辨識	選擇 DeepLab v3+的補充說明將會放入修	同意辦理
方式,另本研究第 61 頁選擇	改後報告書,謝謝委員意見。	
DeepLab v3+做為影像辨識模式,建		
議補充說明選擇 DeepLab v3+之原		
因,請補充說明。		
報告 81 頁有關 I 型梁飛行設計部	此種航線設計有考慮到航線設計過程的	同意辦理
分,需拍攝大梁、橫隔梁、橋面板	複雜度,以及實際飛行時的安全性,要盡	
底部後,再拍攝大梁兩側以及橫隔	量避免無人機高度與姿態有重大變化。此	
梁側邊,如此拍攝方式似乎較無效	外,這些航線可以連接在一起接續進行,	
率,無法一次飛行完成拍攝,是否	若無人機續航力夠,就有機會一個架次完	
有相關改善方式。	成,但目前常見的無人機續航力應該都無	
	法達到此效率(除了繫留型)。未來實際航	
	拍效率如何還有待實際操作時進一步評	
	估。	
報告 113 頁相關內容提及人工智慧	遵照辦理	同意辦理
影像辨識取代現行目視辨識影像		
工作,建議均修正為協助取代現行		
目視辨識影像工作。		
報告 114 頁有關 E 值計算部分為	是的,未來落地應用前仍需再與橋檢專家	同意辦理
112 年計畫執行內容,而裂縫 E 值	商討 DERU 之估算方式。	
計算方式建議仍需後續召開專家		
學者會議討論之。		
結構裂縫與非結構裂縫無法以單	是的,結合橋梁構件 3D 模型將有機會研	同意辦理
張影像辨別之,建議後續結合橋梁	判是否為結構裂縫。	
3D 建模後,可以嘗試以裂縫方向以		
及所在位置辨識之。		
報告 121 頁表 4-7 辨識成果之指標	報告書數據有誤,將會更正。	同意辦理
比較, 白華使用 DeepLab V3++下,		
各項指標都優於 DeepLab V3+,為		
何總體準確度 DeepLab V3++會低		
於 DeepLab V3+,請補充說明。		
報告架構部分,最後一章應為結論	遵照辦理	同意辦理
與建議,請修正。		
第11頁提及「而檢測種類部分,則	此段為文獻中之敘述,將會在期末報告修	同意辦理
沒有初期橋檢規定,竣工資料、初	正版中更正。	
期橋檢資料」,與目前作業規定不		
符,建議修正。		
第 13 頁「研究小組對無人機進	遵照辦理	同意辨理
行」建議修正為研究小組「使用」		
無人機。		
第 14 頁「這座橋梁夠低能以人工	遵照辦理	同意辨理
方式」建議修正為橋梁梁低不		

吉 同		
第16頁「3D模型等等」建議修正	遵照辦理	同意辨理
為 3D 模型等,另「交通控制要求」		
建議修正為交通維持。		
第17頁「保留視訊」建議修正為保	遵照辦理	同意辨理
留影像。		
第18頁「部屬系統」建議修正為部	原始網路資訊並未說明哪些成本,其他建	同意辨理
署系統,另「實時分析」建議修正	議已修正。	
為即時分析,文中提及節省可觀的		
成本,應說明為何成本。		
第19頁「橋底的馬賽克」,建議修	「橋底的馬賽克」改為「全區之拼接影	同意辨理
正文字,另「難以觸及的組件」建	像」,「組件」改為「構件」。	
議修正為難以觸及的構件。		
第20頁「實時捕獲」建議修正為即	「實時捕獲」改為「即時捕獲」, 刪除"駕	同意辨理
時捕獲,此外減少駕駛員的分心和	駛員", 增加 MDOT 英文全名。	
不便,與內容不符建議修正,另		
MDOT 為何單位,建議補充說明。		
第 21 頁 DOT 單位名稱應加上美	DOT 前加上美國。探路者為卡車之廠牌	同意辦理
國,文中提及探路者卡車,建議補	名稱,已經刪除。「檢查橋梁的某個方」	
充說明,此外「檢查橋梁的某個方」	改為「某個地方」。	
建議修正為某個地方。		
第24頁「工程師有限且耗時長」建	「工程師有限且耗時長」改為「工程師人	同意辨理
議修正為工程師人力有限且工作	力有限且工作費時」。	
費時。		
第29頁「使得在上採樣」建議刪除	「上採樣」英文為 up-sampling,不能刪	同意辨理
上字。	除"上"這個字。	
第 31 頁使用 U-Net 方法案例為生	已刪除,謝謝。	同意辨理
物醫學,與本研究橋梁目標不符,		
建議刪除。		
第35頁「噪音」建議前後一致,修	全文中所有「噪聲」或「噪音」已統一修	同意辨理
正為噪訊。	改「噪訊」	
第48頁「2017年之前的網路架構	已修正	同意辨理
的主流」建議修正為 2017 年之後。		
第 69 頁「臺灣地區橋梁管理資訊	此名稱與招標文件內容一致,不宜改變。	同意辨理
系統」建議修正為車行橋梁管理資		
訊系統。		
第74頁「見圖三」,文中並無圖三,	已修正	同意辨理
請修正。		
第81~85頁「橫膈梁」建議修正為	已修正	同意辨理
横隔梁。		
第81~88頁「簡支梁」建議修正為	已修正	同意辨理
I型梁。		
第89~90頁「廂型梁」建議修正為	已修正	同意辨理
箱型梁。		

第90頁「圖 3-40(上)、圖 3-40(下)」	改為側面圖與上視圖	同意辦理
並無對應相關圖名,建議修正。		
第 90 頁內容之圖 3-39 應為圖 3-	已修正	同意辦理
41 •		
第121頁根據章節0提到的平均交	已修正	同意辦理
併比,並無敘明章節,建議修正。		
報告中「橋樑」建議全部修正為橋	已修正	同意辦理
梁。		
十七、主席結論:		
期中報告之後團隊做了許多努力,	感謝委員的肯定	同意辦理
研究成果也有所展現。		
後續有關執行面、推廣上等課題,	遵照辦理	同意辦理
期望團隊能夠在112年訂定相關的		
操作手册、說明書等。		
期望團隊朝特定型式橋梁全橋使	遵照辦理	同意辦理
用無人機進行檢測,並且後續毋需		
以人工再重複檢測為目標。		
目前團隊已研發六大主要構件的	本研究會繼續研究如何克服相關問題	同意辦理
AI 辨識模式, 而橋梁尚有其他構件		
需進行檢測,後續請團隊再努力研		
究克服。		
報告書請團隊修改符合本所出版	遵照辦理	同意辦理
品規定,並且註明引用文獻圖表的		
出處。		
審查會議各委員及與會單位研提	遵照辦理	同意辦理
之口頭及書面意見,請國立成功大		
學研究團隊整理「審查意見處理情		
形表」,且逐項說明回應辦理情形,		
並充分納入報告之修正。		
本研究經徵詢審查委員意見,報告	感謝所有委員的肯定,並於12月15日以	同意辨理
初稿審查通過,請國立成功大學研	前提送報告書修正版。	
究合作團隊於 111 年 12 月 15 日前		
提送報告書修正定稿。		
# 附錄 3: 橋檢專家諮詢會議紀錄

採購案編號:MOTC-IOT-111-EDB006

- 採購案標的名稱:無人機搭配 AI 影像辨識應用於橋梁檢測之研究(1/2)-橋梁劣化 構件 AI 影像辨識之技術開發
- 時間:111年6月13日下午2:00
- 地點:視訊會議
- 主席:劉光晏教授
- 紀錄:謝孝勇
- 出席人員:

國立成功大學土木工程學系劉光晏	教授
國立成功大學測量與空間資訊學系饒見有	教授
國立成功大學測量與空間資訊學系林昭宏	教授
國家地震工程研究中心橋梁組陳俊仲	研究員
公路總局養路組楊秉順	科長
中華顧問工程司蔡欣局	主任
交通部運輸研究所許修豪	研究員
交通部運輸研究所胡智超	研究員
台灣世曦工程顧問股份有限公司第二結構部吴弘明	副理
林同校工程顧問股份有限公司劉以毅	總工程師
台灣整合防災工程技術顧問有限公司楊依璇	技師
黎明工程顧問股份有限公司橋梁組李坤哲	協理
萬鼎工程顧問股份有限公司林育賢	組長
鹿島工程技術顧問股份有限公司負責人刁健原	技師

- 1. 會議簡報說明
  - 此計畫為「交通部運輸研究所」委託研究計畫,目的係藉由人工智慧影像辨識取代現行目視辨識影像工作,提升橋檢品質及效率。計畫照片來源為「台灣地區橋梁管理資訊系統,資料庫」。因 DRU 評分具有顯著差異性,故擬借重各委員專業意見,改善 DRU 評分後獲得一致性結果,提升人工智慧化影像辨識成果之可靠度與準確性。依據「公路橋梁檢測及補強規範」之劣化評等表,評定 DERU 分數。本案例行工作會議建議,DERU 分數以表定分數和級距組合為原則。參考資料為、「公路

橋梁檢測及補強規範」、交通部運研所公路橋梁檢測人員「培訓教材」、「高速公路橋梁目視檢測手冊」、「公路總局公路養護手冊」。

- 目前規劃按照 DRU 評等表填寫,當中發現一些分數的不一致的地方,考慮 R 跟 U 值是否採用連動的方式填寫,這裡也是要請教各位專家的意見,現在團隊提案的是 R 跟 U 值採用連動的方式,也就是當 R 為 3 時對應到 U 等於 3 的情形,避免有交 錯的組合。如果當我的 R 值等於 3,它的重要性是中等的但是我又要求他要做緊急 處置這樣子是不是一個合理的分數。
- 在照片方面,我們挑了大概 655 張的照片卻發現其中可能有將近 52%的照片分數需 要被調整,可能是提高也有可能是降低的情況。我們所討論的構件類別是橋墩/帽梁、 橋台、主梁、橫隔梁、橋面版、翼牆/擋土牆。紅色的標記就代表我們覺得可能需要 被調整分數的照片,剛剛有提到將近一半的照片是有樣的情形,這邊要請教各位專 家我們所調整分數的部分是否恰當,後面就用照片來舉例調整分數的情況。
- 我們做了一個初步的規劃,就是我們把 DRU 評等表分數把它拆解出來,並且補充 了一些說明的文字,來補充說明拆解後的分數原因。為什麼一直很強調要把這個分 數拆解細分,因為我們後需要做 AI 訓練的時候我們必須很清楚知道每一張照片他 所對應到的 DRU 數字,我們並不是給他一個模糊的空間,沒有清楚的界定在做 AI 訓練的時候是有困難的,我們必須把它拆解後讓它有很精準的這個數字,這是我們 在進行這個計劃當中所必須面臨到的問題。
- 今天的會議最主要集中在討論這個評等表格,這些規範既有的表格,目前我們試著 去定性的描述它,並更具體將分數放置在對應的劣化情況,後面的照片裡,展示各 種劣化對應的分數,我想在先前的信件當中,已先向各位委員表達我們有嘗試的去 做這些分數的調整,不過畢竟是我自己內部的一個觀察,可能會有太過主觀或者是 不適當的地方,
- 我們希望今天的會議當中是否就我們剛剛做的說明,來做給予分數的方向,並且這 些修改過的分數,我們會將它放入 AI 訓練的模型裡,如果分數是錯誤的那後面訓 練出來的東西大概也有沒有太大的意義,我們非常重視今天的會議,也希望各位專 家給我們意見,希望凝聚大家的共識之後,我們讓這一個表格可以非常具體可操作 那我們會根據這樣子的原則之下,再去修正剩下來的照片,因為我們現在選用的照 片大概只有 1%的量,我們覺得這個問題應該要盡早提出來,才可以讓這個成果的 這個準確度可以提高。

- 今天提案討論的議題會是R、U評等採用連動法之可行性、照片拍攝遠近影響裂縫之處理方式、E範圍的計算,例如裂縫計算 E 時,為判定裂縫所占整個構件的長度......等等,希望專家們可以給我們意見,讓我們可以進行。
- 2. 與會專家說明

## 吳宏明

- 在RU分數連動方面,養護單位他們常常就說他們常常不希望到3或4,因為在一年內或緊急維修的話,他們其實對養護單位他們來講是有一點困擾可能會造成他們養護單位執行的問題。另外劣化範圍E值的部分,如果僅用一張照片來判斷的話我們是認為有一點困難度是蠻高的,
- 至於裂縫範圍 E 計算,像是橋台常常都是一條垂直裂縫,這一條裂縫到底是有多少 的影響範圍就是很麻煩的事情,目前一般我們在裂縫計算裂縫範圍是參考日本的裂 縫密度的關係來計算,計算在 50 公分內大概有幾條這樣子。

### 劉以毅

- 針對這個連動上的問題,本來 RU 是有一個彈性在那邊,然後我們現在把它變成連動就變成就是比較缺乏這個彈性,對主管單位來講 U 等於 4,需要緊急處置對主管機關會有困擾。
- R與U一般來講,U都會至少是大於等於R值,但是有一些在特殊的狀況像是某些情況R等於3,但如果是有礙觀瞻的時候,此時建議緊急處置的時候,這個時候就可以保留彈性立即處置。
- 在簡報第49頁,橋底部的鋼筋銹蝕的很嚴重都露出來,但是橋台前面是受壓側, 不像是橋台後面受拉測影響這麼大,橋台內側的張力鋼筋還是比較最重要的,此時
   U值可能給3,R值給4的情形。

### 刁建原

結構的安全性有時候不是那麼大,但是如果混凝土塊可能會掉下來砸到用路人,此
 時在使用上的急迫性就會大於結構上的急迫性。

- 其實我們沒有好像沒有一個很清楚到底什麼是結構裂縫,如:鋼筋生銹鼓脹造成的 裂縫、鋼筋轉彎處還有不同構件之間不同材料之間的裂縫、施工界面的裂縫......等
   等,算不算結構裂縫,因為這些好像都沒有一個很清楚會界定,造成一些我們在操 作上困難,就自己來說我覺得有些都不是結構裂縫,像29頁跟31頁,有些施工的 界面我們都把它當成是很嚴重的裂縫滲水,他只是一個施工界面對結構上有這麼嚴 重的影響嗎?好像並沒有,第29頁的那個轉角的裂縫,應該只是轉角一個結構上 轉彎的地方,並不是這麼嚴重的裂縫。
- 所以結構裂縫,我覺得應該是外力造成的這些好像就定義上來看,應該不算結構 裂縫,像是滲水造成鋼筋生銹產生裂縫,滲水造成的裂縫是因為鋼筋生銹膨脹混凝 上破裂造成,他不是因為外力造成的,我們好像沒有定義清楚什麼叫做結構裂縫, 我認為結構裂縫應該是地震力或是其他外力所造成的裂縫,才是結構裂縫。
- 裂縫大小的部分可以透過觀測的距離去計算裂縫的大小,或是在旁邊放置一個裂縫 觀測尺去得到裂縫的大小。

### 李坤哲

- DRU 當初審定規範的時候那時候就有討論過其實應該要連動,就是嚴重程度跟他的維修的時間這部分的是必須要對應的,但是實務上嚴重程度可能因為維修的急迫性而調整,例如可能有一塊混凝土可能就是有剝落的這個情形,雖然不是很嚴重,但底下方有車輛通過,若砸下來可能就會產生很嚴重的後果,所以保留一個彈性讓他去調配,一般來講DRU 若是 433 或是 434 大家還是可以接受的,但是若是 443,已經壞了很嚴重這個情形後續的處置方法為一年內的話,這樣子是大家都比較是比較沒有辦法接受的情形,當初在訂規範的時候是有給一個範圍去調整,但是基本上DRU 還是要照分數連動性去評等。
- 須要提醒目前執行的團隊,後續要去找裂縫的時候,你找的是結構性裂縫了還是裂縫,當初講的混凝土結構裂縫就是承載力或是地震力所造成的裂縫,保護層不夠或者是說蜂窩的那些情形的話,我們是不會把它放在結構裂縫裡面,如簡報第15頁第16頁這邊有滲水出來,這邊看起來應該是在漲潮時候造成裡面的鋼筋的膨脹造成裂縫,我們目前是不會把它歸為結構性斜裂縫,我們會把它列為是其他損傷。之後你用 AI 訓練裂縫的辨別,但是你要如何知道你這是結構裂縫還是這個非結構性

202

的裂縫,這個是目前大家可能要再努力的一點,再看第 17 頁墩橋的裂縫,他可能 是在橋梁拓寬的時候造成的結構性的裂縫,所以這時候列為結構性的裂縫。

- 單純看照片的話要去打 DRU 的分數比較困難,若分數太高可能不符合養護單位的 期待會造成他們的困擾,最近我們在看報告的時候,光看一張照片還不太容易判斷, 我們還會需要去找 4、5 張照片才能夠確定損傷的狀況,一些複審的部分會要求寫 損害狀態與損害的原因是什麼,有時會需要去現場與更多的照片才能做判斷。
- 我們有時看到一根鋼筋已經露出在外面的狀況,我們就會寫這個是這個泥土破碎然後鋼筋外露生銹,但是這板橋是民國 67 年到現在是 50 年的橋梁,他現在是有一些氧化的情況,如果將其分數打到 433 或 444 可能會不符合這個單位的期望。另一種情況為橋台會有一條施工縫,它的背後會滲水的這個情形,我們看到那種施工縫而且他的角隅很容易混凝土剝落,這時候我們就會適度的把他的 DRU 降低。
- 一些的破碎是管線在施工的時候所造成的破碎,並不是說所謂的結構性的這個壓碎 破碎那另外也可以看到保護厚度的不足,造成鋼生銹蝕並且跟其他結構物的碰撞, 碰撞之後造成的這個混凝土破碎的部分呢,我們還是希望這個損壞橋檢單位能夠適 度的把它單獨出來看待。
- 簡報第94頁左邊圖片的劣化狀態,這種情況會將其列為破碎,嚴重情況就不會這麼的嚴重,如果是將其列為裂縫就會變成是嚴重裂縫的情況,因此評等分數就會是嚴重的,這邊是建議將其視為破碎的情況。
- 目前公司有做 AI 訓練的部分是先訓練裂縫的判別然後進行初篩,並且利用這個無 人機自動收集照片回來,透過初篩後已經節省許多的時間,然後工程人員再進一步 地進行結構裂縫與非結構裂縫的判別。我們還有再進一步地進行照片的分類,裂縫 發生的位置與角度,讓之後的 AI 功能可以更好,進行結構裂縫與非結構裂縫的判 別,這是我們目前 AI 部分的一些經驗。
- 在裂縫範圍的界定上,前一版的規範是用 0.1、0.2 公厘的定義,但是這不僅是對於 無人機的判定上可能無法做到,連工程人員去量測都有一定程度的困難,因此目前 我們是使用南非的規範,採用 0.3、0.6 的界定去定義細微、明顯與嚴重裂縫。

### 楊依璇

有關E值在裂縫上的計算方式,通常是用長度去記錄他的裂縫的劣化的情形,我們
 是建議有關裂縫的範圍計算可以用他的面積來做一個判斷方式,例如:我現在是一

個是 45 度的斜向裂縫,可以去量測他的水平與垂直的裂縫長度,用量出來的長度 與寬度相乘就可以得到面積,然後再與全部面積相比即可以得到百分比 E 值;

- 如果今天是一個垂直的裂縫,可以假設一個 5~10cm 水平寬度再與垂直的高度相
  乘,最後與總面積相比即可以得到百分比 E 值。
- 對於一些情況可能計算出來的 E 值不大,但是可以透過 R 與 U 值來做調整,來辨 別其嚴重狀態。

# 陳俊仲

- 關於 DRU 連動性的問題,我是覺得有時候可能會有一些衝突,如果將其評等為嚴重,可能會造成保養單位的壓力,保養單位可能沒有足夠的時間與經費去做修繕這都會是一個問題。
- 此計劃案能夠使用到資料庫的資料庫將會是一個寶貴的資源,據我知道可以利用劣化的圖片與配合的 DRU 值一起做訓練,圖片越多樣性應該可以得到良好的訓練狀態。
- 如前面各位專家所提到,橋檢的劣化的種類包含了結構裂縫與非結構裂縫,裡面有許多的專業的判斷,這些判斷有時候連實務界都可能有困難去做判斷,AI的判斷是 不是有辦法可以百分之百的取代,這個是可以討論的地方。
- 從簡報內容劣化評等部分,劣化裡面包含了細微、明顯、嚴重裂縫,有沒有滲水、 鋼筋是否外露,從這些特徵來看應該可以方便 AI 的訓練,但是若同一個位置如果 有多重的劣化,是否也可以判斷出來,這部分或許有困難。目前看到資料庫裡面有 60 多萬張圖片,已經清了 600 多張,未來要將其全部的清洗並且標註,我想將會是 一個非常花費時間的事情。
- 裂縫大小的部分,我們過去有透過 UAV 的開發掛上測距的模組,在拍攝照片的時候知道距離後基本上裂縫的尺寸就可以知道了;對於現存資料庫的照片,建議可以分類成近距離拍攝與遠距離拍攝,再來做裂縫尺寸的分類。至於劣化範圍 E 計算,進行裂縫長度的量化後即可得到裂縫範圍的資訊。

## 林昭宏

在 AI 訓練影像處理方面,我們常常去取的影像特徵其實不是他的顏色而是他的梯度,就是他的他的色差在拍的時候確實是不同時段,早上中午晚上下午有不同的亮

另外一方面可做影像增廣,在訓練模型的時候都有一個資料增廣,增廣也可以對影像他的色彩做調整,增加他的資料量與多樣性。

# <u>楊秉順</u>

- 部分照片不易判斷位置,難以釐清急迫性。
- 建議 D、R、U 應屬於一起連動,如 D 損害嚴重+R 重要性高,則 U 值應要較大。
- 照片拍攝遠近確實影響到整體判斷之全貌,難以判斷裂縫造成原因,是否能再配合
  3D 位置標示進一步判斷可行性。
- 因無法見到全貌, E 範圍的計算困難度較高,且如屬結構性裂縫,雖然占整體範圍 不多,但卻可能達 D 和 U=4,故 E 值對於後續橋梁安全分析所占角色較不重要, 除非屬於鹽害橋梁大面積之混凝土剝落或是裂縫產生。
- 各構件依據規範再細分,原則無意見。惟裂縫是否造成急迫性須取決於裂縫位置及發生成因才能更明確決定。建議如屬於嚴重裂縫,建議還是 444,除非位置係屬於完全不影響結構問題。
- (這邊已列出幾項楊委員對於簡報內容建議,其餘已納入之後評定 DRU 值之參考意
  見。)
- 簡報內容建議
- P11,分類無意見,惟須取決於裂縫位置及發生成因才能更明確決定。但如屬於嚴 重裂縫,建議還是 444。
- P14,如果是跨河段橋梁需要特別處理,如很多位置皆有這種情況,像是系統性問題。比如內部鋼筋生銹造成裂縫。
- P15,右側照片,位置及裂縫走向不明確,難以判斷嚴重性,裂縫寬度似乎很大。

# 饒見有

 我們知道結構裂縫跟他所發生的位置有關,我們過去所採用的一個做法是先進行
 3D的建模,針對這個橋梁上面的每一面,那我們拍照的時候當然就是正射的角度, 像是我們是上次拍攝用 0.2、0.3 公厘的這個空間解析度,然後繪製所有的正射影像, 我們知道每一個正射影像,這樣進行裂縫的偵測與 AI 的判釋。

- 對於E值的計算,我們對於每個構件都有編號可以整合來計算E值,透過距離與裂縫的長度來推估大蓋的面積,我們是利用這種概念來推估E值。這個是過去跟中華顧問工程司一起合作的成果,但是還沒有實現,可以透過這個概念在這個計劃案把它實現。
- UAV 裝雷達是針對單張照片去做處理的,那如果我們有 3D 建模,其實是可以不用 在無人機上裝設雷達,這樣會增加無人機的重量,減少無人機的續航力。
- 在簡報上寫目前有 67 萬張圖片,但是因為裡面包含了 3D 位置的圖片,且我們主要 是針對 3 種劣化與簡報上的這些構件挑選,實際上並沒有這麼多張圖片,目前標註 的數量為 3 千多張的圖片,不是每一張圖片都要標註,我們花費了三個多月的時間 標註了 3 千多張的圖片,這部分花費了非常多的時間。
- 對於細微裂縫的建議,這邊是不是將細微裂縫界定為0.5公釐以下,因為無人機如
  果要量測到小的尺度,這會對無人機的飛行很危險,因為需要靠近目標物很近。

## 蔡欣局

RU 值連動問題

- 規範中提供之評等表及照片僅供參考,實際上操作RU值是可以採用不連動的方式, 對於現場作業及特殊案例比較具有彈性,但也常造成人為主觀上的評等差異。但目 前執行團隊簡報中依據規範的判定標準分級提供 AI 判別,基本上是以劣化狀態來 做判別,判別後的 DRU 基本上之固定連動的了,這樣的模式確實可能較適合 AI 的 訓練。
- 未來橋梁檢測作業模式,也可能需因應 AI 的發展進行調整,無論是目視檢測或 AI 檢測,都可能發展定位為初篩的層級及功用,後續是否需進一步詳細檢測、監測或 修復補強,應由專業工程師再做判斷決定,不再單純以資料庫系統中 U 值直接決 定。
- 簡報 P11
- D=4 的明顯裂縫部分,劣化狀況已註明有滲水,所以第三列的"沒滲水"的敘述應該 適度調整。另外,原本對於裂縫的判斷,是依據裂縫寬度及有無滲水或鋼筋銹蝕現 象來判斷,執行團隊增加了"但有影響大的裂縫型式,例如斜向裂縫"的判斷標準, 這將會增加兩個判斷因子(裂縫位置及型態),AI必須依據其裂縫位置及裂縫型態才

可判別,實際執行上是否會有困難,可再研議。

- 建議對於明顯裂縫有滲水及嚴重裂縫的分級標準,應該與細微裂縫滲水與明顯裂縫
  沒滲水的評等標準一致。
- 簡報 P15 左邊案例,細微、明顯、嚴重的裂縫分級,規範是開放給橋管機關自訂之, 由於高公局及公路總局目前應該是定義裂縫寬度超過 0.6mm 以上屬嚴重裂縫,所 以評定為 DRU=444。建議未來執行時盡可能依循現有橋管機關常用的裂縫寬度標 準訂定之,並依循標準進行 AI 訓練及判識。
- 建議滲水、白華分為兩種不同劣化類型進行訓練與辨識,再依據辨識結果對應 DRU 值。

照片說明及 DRU 值建議:

- P19 右圖,應為嚴重裂縫, D=4。
- P30 右圖, D 應調整為 3。
- P45 兩照片應該都有白華現象,是否代表應有滲水現象。
- P65 右圖依照前面標準定義, U應=3, P66 同樣 U應=3

## 胡智超

- 感謝各位專家學者的意見,這對我們的幫助很大,本研究想要利用 AI 的檢測方式 來協助橋檢作業,一開始是有點難度但這是我們最後的一個目標。在短期內想要來 取大人工檢測可能無法完成,讓我們持續朝向這個目標來努力。
- 剛剛有許多專家提供的意見再麻煩將其納入,規範的部分主要是給工程人員使用的, 跟利用 AI 來判讀是不太一樣,使用 AI 來判讀可能還需要更精細,至於要如何讓 AI 來評定的表還需要再加註,請團隊再繼續的努力,讓 AI 可以進行判定。
- 對於 DRU 的部分,如前面專家學者所說,如果 R 為 4 那 U 就不可能為 3,這部分可以納入,對於劣化位置的示意圖,目前有對劣化的位置打叉的標註標示,不曉得這對於研究團隊是否有幫助,如果有的話再請中大進行提供。請研究團隊對於今天專家學者的意見進行收斂,讓評定上具有一致化。
- 目前裂縫的量測以定性的方式判別,遵照規範的規定。

附錄 4: 「應用 AI 影像技術辨識橋梁構件劣化」座談會會議紀錄 採購案編號:MOTC-IOT-111-EDB006 採購案標的名稱:無人機搭配 AI 影像辨識應用於橋梁檢測之研究(1/2)-橋梁劣化構件 AI 影像辨識之技術開發

- 時間:111年10月31日下午13:30~16:00
- 地點:交通部運輸研究所5樓會議室
- 主席:賴威伸 組長
- 出席者:如簽到表
- 記錄:黃立宗

# 討論議題與答覆

- 無人機是否有訊號不良的問題?台北市的環東高架橋有兩層,操作人員要站在何處操作無人機,或是依循衛星定位就可以自動完成航行、拍攝?
  - 本研究開發之無人機使用視覺定位、UWB、IMU、RTK 融合演算法,可讓無人機 在橋下無 GPS 訊號的環境下進行定位導航與飛行拍照,所以只要起降點到拍攝處 無障礙可視覺觀測即可運作。
- 2. 無人機飛行的定位是採絕對定位或相對定位?
  - 團隊開發的融合演算法有融合 GPS/RTK,在未飛入橋底無遮蔽的空間會有 GPS 絕對定位,飛入橋底失去 GPS 定位時,則依賴視覺定位、IMU、UWB 去輔助運算飛機位移量並換算成經緯度及高程,定位成果也是絕對定位。
- 3. 台北市的飛行禁航區很多,要如何克服?
  - 禁航區對無人機相關的行業沒有太大問題,無人機的法人公司有通過民航局的審查, 可按照規定申請飛行,一次三個月可在申請區內飛行,禁航區並非完全無法飛行。
- 4. 飛機的續航力有多久,記憶體多大?
  - 目前研究團隊的無人機上有一台 Intel NUC 迷你電腦,可搭載 512GB 至 1TB 的 SSD

儲存裝置,相機內的記憶卡也可以達到 512GB,拍攝容量都不是問題。

- 5. 飛行遇到側風的問題如何解決?
  - 團隊目前設計的無人機抗風等級大約是5級風,正常情形下飛行都是沒問題的。一般無人機較不會在5級風以上執行飛行任務,除非是軍事用途或是海巡任務才會設計比抗5級風的等級更高。
- 驗證精度是用人工去驗證或是使用照片當作驗證?如何讓機器判定 DERU 的結果與人工 經驗判定的結果相近?
  - AI 模型的驗證一定要有人工標註的真值才有辦法驗證。
  - 本研究計畫含劣化區域辨識及 DERU 推估兩個模型,劣化區域辨識模型會將整體 4000 多張影像切割成 40000 多張影像使模型達到收斂,目前使用的模型都帶有轉 移學習的技術,是由原本有良好雛形的模型套用額外的資料集收斂過後,再套用在 我們所給的橋梁劣化影像再收斂一次。DERU 的模型問題比較大,4000 多張資料沒 有做切割進行訓練,其中又含 3 種劣化類型模型,每個模型只分到 1000 多張影像, 有過度擬合的情形,後續擴大資料量後此方案是可行的。
  - 訓練資料與驗證資料是分開獨立的,驗證結果 DERU 模型的訓練資料還需要再增加。
- 7. 訓練 AI 時有修改 DERU 的基準,能否更詳細說明?
  - 在6月13日辦理過專家學者座談,討論資料庫的影像資料並針對照片微調 DERU 分數,是因為目前資料庫資料庫中的影像 DERU 的評分沒有完全按照規範要求。
     DRU 三者分數應有連動性,在資料庫中有些卻是散亂的,這對訓練 AI 模型容易產 生誤判。
  - DERU 的評定保留給現場檢測人員彈性調整分數的空間,這對 AI 模型訓練是不利 的,因此團隊根據橋梁檢測規範將數值調回符合規範的值。
- 8. 橋梁 3D 建模需要人工全橋完整飛過一次,可能會耗費大量成本。
  - 3D 的建模時間要看該橋梁結構的複雜度而定,簡報展示的模型有許多Ⅰ型梁複雜

度較高,人工數化所花之時間與成本會較高。

- 現階段還是需要人工用無人機先拍一次,才有辦法建置航線並進行 3D 建模,在未 知環境進行自動飛行有其風險。
- 9. 正射影像如何產出,要多久時間產出?
  - 建置完成橋梁 3D 模型,在模型的表面切割成大小相近的矩形框,將原始相機拍攝影像用坐標校正成每個像素都是垂直表面拍攝的正射影像,並貼合在矩形框上得到 直實世界的尺寸。
- 10. 若沒有做 3D 建模的橋梁也能夠適用 AI 模型嗎?
  - 3D 模型的建置還是回歸到各單位的需求,有沒有需要持續追蹤橋梁多時期的劣化 程度?若只是要觀察該橋梁有無劣化,劣化的位置不用太準確,不一定要做 3D 模型也能夠用 AI 偵測劣化。若橋梁之重要性相當高,要持續觀察其劣化情況是否有 惡化情況,就需要製作橋梁 3D 模型。總之,本研究所開發之技術可以滿足多元的 需求,依使用者的目的需求,可以選擇不同的處理層級。
- 目前訓練資料品質、拍攝標準不一,未來無人機出去拍攝品質更好的影像後,如何更新
  AI模型?需要定期請團隊調整參數嗎?或是模型能夠自動套用新影像更新?
  - AI模型訓練常常不是一次完成,資料訓練幾次會動態調整參數達成最佳化,拿之後 拍攝品質較高的影像加入現有模型中訓練會方便很多,只需要做模型的微調,不太 需要更改模型架構。目前本年度計畫還沒有規劃這個步驟,比較好的方式是各單位 拍攝之影像回饋到本研究調整模型,若各單位內部有相關的專業人士可以自己做模 型調整也是沒有太大的問題。
- 12. 運研所未來會如何推廣此技術?對實務單位有何要求?
  - 會慢慢讓橋管機關瞭解使用無人機的效率,或許會結合交通部的評鑑,會慢慢的演進推動。
  - 此技術也可以套用在其他混凝土的建物上,利如隧道、水壩、堤防等。

- 13. 從無人機拍攝回來後到點雲、3D 建模到產生正射影像要多久時間?
  - 將拍攝回來的影像直接辨識劣化區域及 DERU,1 張影像只需 2~3 秒,正射影像 1 個矩形框約 50cm x 50cm,製作 2500x2500 正射影像大約也是 2~3 秒,整座橋需要 幾個小時,但這些處理步驟都是自動化處理,不需人工介入。目前所有程序中最花時間的是 3D 建模,現階段需要人工數化,團隊會朝半自動 3D 建模的方向努力, 以減少成本。

14. 主席總結

本研究將等到技術純熟後才會開始推動,AI 判定與人工檢測的轉換也牽涉到相關法律的 修訂,會尊重所有橋管機關的意見,運研所做先導型的研究輔助各機關進行橋梁維護管理,此 技術也無法覆蓋所有形式的橋梁,屆時也請各單位協助解決實務上遇到的問題。



會議現場照片

附錄 5: 影像劣化區域辨識結果



劣化编碼顏色:















	裂縫	剝落	銹蝕	白華	滲水
原始影像					
標註影像			$\sim$	ł	
DeepLab V3++驗證結 果			$\sim$	Í	
DeepLab V3+驗證結 果				Í	
	裂縫	剝落	銹蝕	白華	滲水
原始影像	裂縫	<b>剝落</b>	銹蝕	白華 () ()	滲水 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)
原始影像	裂縫 		<b></b>	<b>白華</b>	滲水 
原始影像 標註影像 DeepLab V3++驗證結 果	<b>裂缝</b>	<b>剝落</b>		<b>白華</b>	滲水

附錄 6: DeepLab v3+與 DeepLab v3++影像劣化辨識結果比較

	裂縫	剝落	銹蝕	白華	滲水
原始影像					egyptat follow so
標註影像				the second se	
DeepLab V3++驗證結 果					Ţ
DeepLab V3+驗證結 果					ł
	裂縫	剝落	銹蝕	白華	渗水
原始影像	<b>裂縫</b>	剝落	銹蝕	白華	滲水
原始影像	<b>裂縫</b>	<b>剝落</b>	<b></b>	<b>白</b> 華	滲水      ごごごごご      「「「」」      「」」
原始影像 標註影像 DeepLab V3++驗證結 果				<b>白華</b>	滲水      ごごごごご      ごごごご      「「「」」      「」      「」      「」      「」      「」      「」      「」      「」      「」      「」      「」      「」

	裂縫	剝落	銹蝕	白華	滲水
原始影像					
標註影像	$\gamma$		(		
DeepLab V3++驗證結 果	$\sim$				
DeepLab V3+驗證結 果			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
	裂縫	剝落	銹蝕	白華	滲水
原始影像	<b>裂缝</b>	剥落	銹蝕	白華	滲水
原始影像	<b>裂缝</b>	<b>刹落</b>	<b></b>	白華	滲水
原始影像 標註影像 DeepLab V3++驗證結 果		利落      (1)			

# 附錄 7:14 座橋梁驗證資料清洗成果

						公路總局				
	公田五號橋	牛眠橋	武嶺橋	嶺橋   崁津大橋   得道橋   新威景觀大橋   溪州大橋(北上線)   溪州大橋(南下線)   旋						
橋台	0	1	2	1	2	6	3	4	5	24
橫膈梁	0	6	17	0	5	0	5	7	1	41
橋墩/帽梁	0	21	32	42	0	0 27 63		52	2	239
主梁	18	20	80	3	9	14	12	11	9	176
橋面板	4	15	11	0	5	15	36	22	3	111
擋土牆	1	0	2	0	3	0	0	0	0	6
小計	23	63	144	46	24	62	119	96	20	597

	高公局								
	20-彭山二號高架橋(S)	356K+705匝道出口橋N(楠梓溪15)	通霄交流道RAMP3高架橋	景山溪橋(南向)	樁號255084(南向)	小計			
橋台	7	5	3	6	9	30			
橫膈梁	0	6	4	1	13	24			
橋墩/帽梁	12	1	4	10	27	54			
主梁	7	11	24	20	30	92			
橋面板	3	0	8	5	10	26			
擋土牆	3	6	0	0	1	10			
小計	32	29	43	42	90	236			



















# 附錄 9: DRU 模型測試結果

历以历	模型偵測	模型推估值			-	真值		誤差		
尔邓尔	劣化區域	D	R	U	D	R	U	D	R	U
No S	A C	3.01	2.75	2.75	2	2	2	-1.01	-0.75	-0.75
		2.35	2.11	2.11	2	2	2	-0.35	-0.11	-0.11
		2.19	2.08	2.09	3	3	3	0.81	0.92	0.91
		2.19	2.08	2.09	2	2	2	-0.19	-0.08	-0.09
		2.88	2.61	2.61	3	3	3	0.12	0.39	0.39
		2.58	2.28	2.27	2	2	2	-0.58	-0.28	-0.27
	A REAL PROPERTY OF	2.85	2.03	2.21	2	2	2	-0.85	-0.03	-0.21

/14		2.19	2.08	2.09	2	2	2	-0.19	-0.08	-0.09
		2.37	1.97	2.02	2	1	1	-0.37	-0.97	-1.02
	1 de la compañía de	2.72	2.00	2.16	3	2	2	0.28	0.00	-0.16
They and		2.35	1.88	2.07	3	2	2	0.65	0.12	-0.07
		2.55	1.99	2.13	3	2	3	0.45	0.01	0.87
		2.85	2.03	2.25	3	2	2	0.15	-0.03	-0.25
		3.10	2.24	2.44	3	2	2	-0.10	-0.24	-0.44
		3.66	3.26	3.28	3	3	3	-0.66	-0.26	-0.28
		2.83	2.55	2.56	2	2	2	-0.83	-0.55	-0.56

		2.77	2.01	2.14	3	2	2	0.23	-0.01	-0.14
		2.17	1.28	1.29	2	2	2	-0.17	0.72	0.71
		2.71	2	2.17	4	3	3	1.29	1.00	0.83
		2.29	2.01	2.03	2	2	2	-0.29	-0.01	-0.03
	- A	2.50	1.97	2.09	3	2	2	0.50	0.03	-0.09
	U	3.12	2.92	2.92	2	2	2	-1.12	-0.92	-0.92
	-	2.11	2.01	2.02	2	2	2	-0.11	-0.01	-0.02
		2.19	2.06	2.08	2	2	2	-0.19	-0.06	-0.08
1 A A A A A A A A A A A A A A A A A A A	- AND	2.87	2.62	2.63	2	2	2	-0.87	-0.62	-0.63

	2.57	1.98	2.12	3	2	2	0.43	0.02	0.88
	2.20	2.09	2.10	2	2	2	-0.20	-0.09	-0.10
	2.09	1.24	1.25	2	1	1	-0.09	-0.24	-0.25
	2.21	2.04	2.07	2	2	2	-0.21	-0.04	-0.07
	2.90	2.74	2.77	3	3	3	0.10	0.26	0.23
	2.18	2.06	2.08	2	2	2	-0.18	-0.06	-0.08
	2.30	1.94	2.05	3	2	3	0.70	0.06	0.95
	2.59	1.99	2.15	3	2	2	0.41	0.01	-0.15

	J. A.	2.48	1.98	2.13	3	2	2	0.52	0.02	-0.13		
--	-------	------	------	------	---	---	---	------	------	-------		
構件名稱:橋墩												
---------	---------------	------	-----	-----	-----	---------------	------	------	--------------	-----	--	--
	劣化類型:混凝土結構裂縫											
現場照片												
劣		D	Е	R	U		D	Е	R	U		
化描述與評等	資料庫 原始值	4	2	3	4	資料庫 原始值	4	2	3	4		
	人工編修後	3	1	2	2	人工編修後	3	1	2	3		
	橋墩柱明顯裂総 象。	逢,但没	有渗水	或鋼筋	銹蝕現	橋墩柱細微裂約 象。	缝,但没	有滲水或	<b>达</b> 鋼筋釼	全地現		

構件名稱:主梁											
劣化類型:混凝土結構裂縫											
現場照片											
劣		D	Е	R	U		D	Е	R	U	
化描述	資料庫 原始值	3	2	1	2	資料庫 原始值	3	1	1	2	
迎與	人工編修後	3	2	2	2	人工编修後	2	1	2	2	
評等	主梁明顯裂縫; 象。屬局部性窘	, 但沒有 裂縫,景	「滲水或 >響程度	、鋼筋銹 小。	主梁細微裂縫 象。	,但沒有	有滲水或	戈鋼筋銵	勢蝕現		

構件名稱:橋台											
	劣化類型:混凝土結構裂縫										
現場照片		1	N		2016/05						
劣		D	Е	R	U		D	Е	R	U	
化描出	資料庫 原始值	2	2	1	1	資料庫 原始值	2	1	1	1	
迎與	人工編修後	4	2	4	4	人工编修後	3	1	2	2	
評等	橋台胸牆斜向       	<b>月裂,</b> 恐 了陷造成	。因基礎 (,影響	下方土程度較	壤局部 大。	橋台明顯裂縫 象。屬局部性	,但没? 裂縫,并	有滲水或 影響程月	戊鋼筋銵 度小。	转触現	

構件名稱:橋面版											
	劣化類型:混凝土結構裂縫										
現場照片			T								
劣		D	Е	R	U		D	Е	R	U	
化描	資料庫 原始值	2	1	2	2	資料庫 原始值	2	2	1	2	
延與	人工編修後	4	1	3	3	人工编修後	2	1	2	2	
評等	橋面版明顯裂編 或鋼筋外露現象	逢,有滲 哀。	水、白	華但是	面版細微裂縫 象。	,但没	有滲水或	戈鋼筋銵	转蝕現		

構件名稱:翼牆/擋土牆										
劣化類型:混凝土結構裂縫										
現場照片										
劣		D	Е	R	U		D	Е	R	U
化描述	資料庫 原始值	4	2	3	3	資料庫 原始值	4	3	2	3
迎與	人工編修後	3	2	2	2	人工編修後	4	3	3	3
評等	擋土牆明顯裂総 象。	逢,但沒	2有滲水	.或鋼筋	銹蝕現	擋土牆嚴重裂! 現象。	缝,但注	沒有滲水	<b>K</b> 或鋼筋	荡銹蝕