

112-008-7D25

MOTC-IOT-111-H2CB001j

無人機影像監測技術應用於臺中 港區管理之研究(Ⅱ)-空間資訊 整合分析平台建置



交通部運輸研究所

中華民國 112 年 3 月

112-008-7D25

MOTC-IOT-111-H2CB001j

無人機影像監測技術應用於臺中 港區 管理之研究(Ⅱ)-空間資訊 整合分析平台建置

著者：韓仁毓、洪維屏、李俊穎、吳日騰、林彥廷、
甘翊萱、黃春嘉、林育銓、王海威

交通部運輸研究所

中華民國 112 年 3 月

GPN：1011200159

定價 300 元

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

無人機影像監測技術應用於臺中港區管理之研究. II : 空間資訊整合分析平台建置 / 韓仁毓, 洪維屏, 李俊穎, 吳日騰, 林彥廷, 甘翊萱, 黃春嘉, 林育銓, 王海威著作. -- 初版.
-- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民 112. 03
面 ; 公分
ISBN 978-986-531-477-4(平裝)

1. CST: 港埠管理 2. CST: 遙控飛機

557

112001086

無人機影像監測技術應用於臺中港區管理之研究(II)-空間資訊整合分析平台建置

著 者：韓仁毓、洪維屏、李俊穎、吳日騰、林彥廷、甘翊萱、黃春嘉、
林育銓、王海威

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.ihmt.gov.tw (中文版>數位典藏>本所出版品)

電 話：(04)2658-7200

出版年月：中華民國 112 年 3 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 50 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：10485 臺北市中山區松江路 209 號 • 電話(02)2518-0207

五南文化廣場：400002 臺中市區中山路 6 號 • 電話：(04)2226-0330

GPN：1011200159 ISBN：978-986-531-477-4 (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份內容者，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：無人機影像監測技術應用於臺中港區管理之研究(II)-空間資訊整合分析平台建置			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN：978-986-531-477-4(平裝)	政府出版品統一編號 1011200159	運輸研究所出版品編號 112-008-7D25	計畫編號 MOTC-IOT-111-H2CB001j
本所主辦單位：港研中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：李俊穎 研究人員：洪維屏 聯絡電話：04-26587126 傳真號碼：04-26560661	合作研究單位：國立臺灣大學 計畫主持人：韓仁毓 協同主持人：林之謙、吳日騰 研究人員：林彥廷、黃春嘉、甘翊萱、林育銓、陳俊廷、王海威 地址：臺北市羅斯福路四段一號 聯絡電話：02-3366-4347		研究期間 自 111 年 3 月 至 111 年 11 月
關鍵詞：無人飛行載具、影像技術、設施巡檢			
摘要： 無人飛行載具在近年來發展成熟，其可搭載高解析攝影機同時具高度的移動性以及遠距遙控功能，能夠取代人力快速且輕易地到達過去不容易接近的區域。再者目前無人飛行載具結合影像技術已經廣泛應用於大範圍或特殊環境條件下的資料蒐集任務中，為在有限人力之下要能持續監測港區設施安全穩定的理想選擇。 本計畫透過無人飛行載具以及影像分析技術建立一個監測系統平台。全程計畫以 2 年期執行，第 1(110)年先完成臺中港區 4,700 公頃之高精度三維及正射底圖，接著由整合載具控制與取像邏輯之分析，建構無人機飛航作業之軟體流程，並基於該流程取得穩健影像資訊來源進行特徵辨識，最後建置系統整合平台將相關功能納入；第 2(111)年則延續第 1 年成果，藉由 3 種改正方法的測試精進影像匹配方法，可轉至同視角與前期影像進行比較。此外，透過與其他無人機研發團隊所共同測試的跟隨技術、自動路徑規劃技術，無人機可成功沿著所規畫路徑飛行，同時可隨著車輛進行穩定飛行，定期蒐集的影像進行分析判識。在物件辨識方面，除原中突堤標的物缺漏視覺化呈現外，更提出 PCI 指標進行北堤路路面評估，成果也獲得相關可行性之驗證。此整合方案可應用於港區的巡檢任務，追蹤港區土地使用狀況以及特定設施之安全穩定性。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
112 年 3 月	230	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：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Application research of the Management of Taichung Port Area based on UAV image monitor technique(II)-the platform for spatial information and analysis			
ISBN (OR ISSN) 978-986-531-477-4 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011200159	IOT SERIAL NUMBER 112-008-7D25	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-111-H2CB001j
DIVISION: Center of Harbor & Marine Technology DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chun-Ying Lee PROJECT STAFF: Wei-Ping Hung PHONE: 886-4-26587126 FAX: 886-4-26560661			PROJECT PERIOD FROM Mar. 2022 TO Nov. 2022
RESEARCH AGENCY: National Taiwan University PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jen-Yu Han Co-PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jacob Je-Chian Lin, Rih-Teng Wu PROJECT STAFF: Yen-Ting Lin, Chun-Jia Huang, Yi-Hsuan Kan, Yu-Chun Lin, Chun-Ting Chen, Hai-Wei Wang ADDRESS: No. 1, Sec. 4, Roosevelt Rd., Taipei City PHONE: 886-2-3366-4347			
KEY WORDS: UAV 、 IMAGE ANALYSIS TECHNIQUES 、 FACILITIES TRACKING			
ABSTRACT : Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technologies have shown dramatic development in recent years. Capable of carrying high-resolution cameras and with the function of high maneuverability and remote control, UAV can replace human labor and go safely and fast where it was inaccessible. Currently by combining with image processing, UAV technologies have further been widely applied to data acquisition tasks in large areas or areas of particular environmental conditions as an ideal option for long-term monitoring to keep the safety of the facilities in the harbor where human resources are limited. This project aims to build a web-based tracking platform with UAV and image analysis techniques. The study was intended to be implemented in two years. In the first year, a high-resolution 3D orthophoto map of the 4,700-ha port area was generated. That is followed by making the software process for UAV flight route planning by integrating UAV control and image acquisition logic; the details of robust images captured by that process will be put to image feature matching. Finally, a platform for system integration will be implemented. The second year followed the results of the first year, some improvements were done. Firstly, three correction methods were utilized to improve the performance of image matching. Furthermore, the UAV can successfully fly along the planned path, fly stably with the vehicle, and regularly collect images for further analysis. In terms of object identification, we presented the result in a visual way. Meanwhile, the PCI index was proposed to evaluate the road surface and the results were also verified successfully. Those methods and results can be applied in the patrol tasks of the port, tracking the condition of land use and the security of certain facilities.			
DATE OF PUBLICATION March, 2023		NUMBER OF PAGES 230	PRICE 300
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

無人機影像監測技術應用於臺中港區管理之研究

(II)-空間資訊整合分析平台建置

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	XI
表目錄.....	XXI
第一章 前言	1-1
1.1 研究動機與目的	1-1
1.1.1 研究動機	1-1
1.1.2 研究目的及重要性	1-2
1.2 文獻回顧	1-2
1.2.1 傳統巡檢	1-2
1.2.2 UAV發展與應用	1-3
1.2.3 影像技術發展與應用難度	1-4
1.3 工作項目與流程	1-6
1.3.1 第一年度(110).....	1-6
1.3.2 第二年度(111).....	1-7
第二章 基礎資料蒐集分析	2-1
2.1 基於UAV影像技術之空間資訊建構.....	2-1
2.2 臺中港區空間資料蒐集與建構.....	2-3
2.2.1 控制點測量	2-3

2.2.2 影像資料蒐集	2-5
2.3 數值地形模型成果	2-6
2.3.1 臺中港區高解析度正射影像成果	2-7
2.4 影像資料蒐集標準化	2-10
2.4.1 中突堤巡檢影像參數	2-10
2.5 本章小結	2-11
第三章 無人飛行載具以及影像感測器硬體分析	3-1
3.1 無人機載具種類性能與感測器分析	3-1
3.1.1 定翼機性能與搭配感測器分析	3-1
3.1.2 旋翼機性能與搭配感測器分析	3-7
3.2 港區氣象資料	3-14
3.2.1 無人機抗風與防水條件定義	3-15
3.2.2 港區風速評估	3-16
3.3 無人機適宜性評估	3-21
3.4 本計畫巡檢無人機設備成本估算	3-22
3.5 本章小結	3-22
第四章 載具控制與取像邏輯方法	4-1
4.1 飛行模式建構方法	4-1
4.1.1 無人機地形測繪	4-1
4.1.2 無人機多點巡航	4-2
4.1.3 無人機單點環飛	4-3
4.2 無人機取像邏輯方法	4-3
4.2.1 影像參數	4-3
4.2.2 A star演算法	4-5

4.2.3 飛航障礙物迴避	4-6
4.2.4 控制與取像參數設定	4-8
4.3 路徑自動規劃	4-9
4.3.1 平台規劃流程	4-9
4.3.2 Mavlink檔案格式內容參數介紹.....	4-10
4.3.3 模擬飛行結果分析	4-12
4.3.4 飛機硬體配置	4-13
4.3.5 路徑規劃飛行成果	4-14
4.4 無人機自主跟隨技術開發	4-16
4.4.1 原理介紹	4-16
4.4.2 實地測試成果	4-19
4.5 本章小結	4-21
第五章 多時期UAV影像匹配辨識	5-1
5.1 UAV影像定位資訊	5-1
5.2 影像位置偵測及量測	5-2
5.3 多期UAV影像搜尋及比對	5-7
5.3.1 三種影像改正分析	5-9
5.3.2 中突堤隨機POI多期影像改正案例測試.....	5-10
5.4 本章小結	5-15
第六章 多時期UAV影像智慧化分析	6-1
6.1 多時期UAV影像智慧化分析流程	6-1
6.2 多時期UAV影像智慧化分析選擇之標的物	6-2
6.2.1 港區道路區域選擇之標的物	6-2
6.3 物件辨識模型選擇項目	6-2

6.4 物件辨識模型選擇	6-3
6.4.1 U net.....	6-3
6.4.2 Feature Pyramid Network(FPN).....	6-4
6.4.3 實例分割mask RCNN.....	6-5
6.4.4 物件偵測YOLOv5	6-6
6.5 岸邊設施自動化辨識分析	6-6
6.5.1 語意分割	6-8
6.5.2 實例分割	6-9
6.5.3 設施多時期比對	6-11
6.6 北堤路設施自動化辨識流程	6-13
6.6.1 物點核算方法	6-13
6.6.2 北堤路設施辨識成果	6-13
6.7 北堤路路況自動化辨識流程	6-15
6.7.1 道路標線辨識	6-15
6.7.2 路面分割	6-18
6.7.3 路面坑洞辨識	6-19
6.7.4 裂縫偵測方法	6-21
6.8 本章小結	6-23
第七章 道路破損評分	7-1
7.1 裂縫分級定義	7-1
7.2 PCI計算流程	7-3
7.2.1 骨幹化(Skeletonize).....	7-5
7.2.2 裂縫寬度量化流程	7-7
7.3 路面裂縫評估成果	7-8

7.4 本章小結	7-8
第八章 UAV影像技術之延伸應用	8-1
8.1 構造物位移監測	8-1
8.2 光達影像分析	8-4
8.2.1 光達感測器介紹	8-4
8.3 熱紅外影像分析	8-6
8.3.1 熱紅外感測器介紹	8-7
8.3.2 煤炭堆溫度準確性測試	8-8
8.3.3 植栽NDVI分析	8-10
8.4 淤沙範圍變化分析	8-13
8.5 沙洲建模分析	8-15
8.6 本章小結	8-16
第九章 無人機影像整合管理平台	9-1
9.1 使用者操作平台系統架構	9-1
9.2 平台模組說明	9-2
9.2.1 量測功能	9-4
9.2.2 UAV航線規劃	9-6
9.2.3 UAV影像查看	9-9
9.2.4 岸邊設施物件辨識成果列表	9-12
9.2.5 北堤路路燈物件辨識成果	9-13
9.2.6 北堤路路面破損評分	9-14
9.3 本章小結	9-15
第十章 實地驗證與品質評估	10-1
10.1 無人機飛行相關檢核	10-1

10.1.1 飛行範圍與作業時間	10-1
10.1.2 無人機飛行穩定性及機動性	10-5
10.2 無人機影像品質檢核	10-7
10.2.1 原始影像解析度檢核	10-7
10.2.2 無人機路徑正確性測試	10-9
10.2.3 影像匹配品質評估	10-10
10.2.4 正射影像幾何精度檢核	10-11
10.2.5 數值地形模型高程精度檢核	10-15
10.3 取像邏輯規劃測試	10-17
10.3.1 無人機航線規劃實際飛行測試	10-17
10.3.2 無人機跟隨實際飛行	10-21
10.3.3 無人機路徑正確性檢核	10-21
10.4 PCI結果之合理性檢核	10-24
10.4.1 PCI計算流程驗證	10-25
10.4.2 訓練模型表現	10-28
第十一章 結論與建議	11-1
11.1 成果結論	11-1
11.2 後續建議	11-3
11.3 成果效益與後續應用情形	11-5
參考文獻	參-1
附錄一、 UAV於港區設施巡檢可行性評估表	附1-1
附錄二、 UAV巡航模式拍攝說明	附2-1
附錄三、 管理平台功能頁面	附3-1
附錄四、 無人機申請流程	附4-1

附錄五、期中審查意見處理情形表	附5-1
附錄六、期末審查意見處理情形表	附6-1
附錄七、期末審查簡報資料	附7-1

圖目錄

圖 2.1 物像空間幾何關係圖	2-1
圖 2.2 SfM空間資訊建構流程圖	2-2
圖 2.3 正射影像倒投影	2-3
圖 2.4 臺中港區地面控制點與基線分布圖	2-4
圖 2.5 航帶範圍與控制點分布圖	2-5
圖 2.6 影像拍攝重疊率	2-5
圖 2.7 臺中港區105年至110年平均潮位圖	2-6
圖 2.8 臺中港數值地形圖	2-7
圖 2.9 臺中港區高解析正射影像圖	2-8
圖 2.10 臺中港區正射影像解析度展示圖	2-10
圖 2.11 中突堤系統平台POI	2-10
圖 3.1 (a)Type1e定翼機 Bee X Fixed (b)Type2定翼機VX2300	3-3
圖 3.2 (a)Type3定翼機 Quantum-Systems Tron F90+ (b)Type4定翼機Sky Arrow.....	3-3
圖 3.3 定翼機最大飛行範圍圖（以港研中心為中心）	3-4
圖 3.4 定翼機安全係數0.7飛行面積範圍圖（以港研中心為中心）	3-5
圖 3.5 (a)Type1多旋翼機K60PRO (b) Type2多旋翼機 Yuneec Typhoon H Pro.....	3-9
圖 3.6 (a)Type3多旋翼機 Aibotix (b) Type4多旋翼機 EG2 Pro	3-9
圖 3.7 多旋翼機安全係數0.7飛行面積範圍圖（以港研中心為中心）	3-10
圖 3.8 多旋翼機安全係數0.5飛行面積範圍圖（以港研中心為中心）	3-11

圖 3.9 臺中港氣象站分布圖	3-15
圖 3.10 臺中港區分區範圍圖	3-17
圖 3.11 臺中港區一月至六月平均風勢趨勢圖	3-17
圖 3.12 臺中港區七月至十二月平均風勢趨勢圖	3-18
圖 3.13 臺中港A區與B區可飛行天數百分比圖	3-18
圖 3.14 臺中港C區與D區可飛行天數百分比圖	3-19
圖 3.15 各區適宜無人機與可掛載感測器分布圖	3-21
圖 3.16 Type2多旋翼無人機硬體購置與維護成本估算清單	3-22
圖 4.1 無人載具之飛行與取像邏輯之整體流程	4-1
圖 4.2 無人機地形測繪示意圖	4-2
圖 4.3 無人機多點巡航示意圖	4-2
圖 4.4 無人機單點環飛示意圖	4-3
圖 4.5 無人機取像邏輯分析(a)GSD圖示 (b)重疊率圖示	4-4
圖 4.6 A-star 演算法搜尋過程	4-6
圖 4.7 A-star 演算法繞行障礙物	4-7
圖 4.8 無人機飛航避障路徑圖（緩衝區設定為5公尺）	4-7
圖 4.9 無人機飛航避障路徑圖（緩衝區設定為10公尺）	4-8
圖 4.10 無人機巡航參數設定與飛行規劃路徑檔案架構圖	4-10
圖 4.11 飛行規劃路徑輸出Mavlink檔案格式內容	4-10
圖 4.12 SITL成功讀取飛行檔案且正確執行示意圖	4-12
圖 4.13 引入之巡檢用無人機圖	4-13
圖 4.14 規劃航線與無人機溝通流程圖	4-14
圖 4.15 單點環飛校園實際測試路徑成果與所對應Mavlink檔	4-15
圖 4.16 多點巡航校園實際測試成果路徑與所對應Mavlink檔	4-15

圖 4.17 地形測繪校園實際測試成果路徑與所對應Mavlink檔	4-16
圖 4.18 人機自動跟隨系統硬體架構圖	4-17
圖 4.19 閉迴路控制系統方塊圖	4-17
圖 4.20 無人機自動跟隨系統實體架設圖	4-18
圖 4.21 自主跟隨式無人機上視圖	4-19
圖 4.22 CASE1無人機跟隨人行走實測	4-20
圖 4.23 CASE1跟隨路徑與拍攝視角	4-20
圖 4.24 CASE2無人機跟隨人車輛行走實測	4-21
圖 4.25 CASE2跟隨路徑與拍攝視角	4-21
圖 5.1 UAV影像辨識方法流程示意圖	5-1
圖 5.2 巡檢照片範例	5-2
圖 5.3 依目標位置進行UAV候選影像相關性篩選示意圖	5-3
圖 5.4 影像色彩RGB與HSV轉換角度涵蓋圖	5-4
圖 5.5 UAV彩色影像萃取明度資訊圖(a)原始UAV影像、(b)紅綠藍光 譜影像、(c)色相、飽和度及明度影像.....	5-5
圖 5.6 SURF主方向(Bay et al, 2008)	5-6
圖 5.7 SURF描述元(Bay et al, 2008)	5-6
圖 5.8 UAV影像中描述元方向及匹配偵測圖	5-6
圖 5.9 糾正後UAV影像套疊於正射底圖	5-7
圖 5.10 多期糾正後UAV影像提供地理定位及量測資訊.....	5-7
圖 5.11 SURF特徵檢測(Bay et al., 2006).....	5-8
圖 5.12 港區中突堤區域設施巡檢POI點分布及多期影像圖.....	5-11
圖 5.13 POI編號253兩期影像匹配特徵點及偵測共同範圍圖(左為基期 影像、右為第二期影像).....	5-11

圖 5.14 POI編號253第二期影像改正成果圖	5-12
圖 5.15 POI編號262兩期影像匹配特徵點及偵測共同範圍圖(左為基期影像、右為第二期影像)	5-12
圖 5.16 POI編號262第二期影像改正成果圖	5-13
圖 5.17 POI編號262基期影像中物件編號位置說明圖	5-13
圖 5.18 POI編號421兩期影像匹配特徵點及偵測共同範圍圖(左為基期影像、右為第二期影像)	5-14
圖 5.19 POI編號421第二期影像改正成果圖	5-14
圖 5.20 POI編號421基期影像中物件編號位置說明圖	5-15
圖 6.1 模型訓練流程	6-1
圖 6.2 影像智慧化分析流程	6-1
圖 6.3 U-net架構	6-4
圖 6.4 FPN semantic segmentation架構圖	6-5
圖 6.5 Mask-RCNN架構	6-5
圖 6.6 Yolov5架構	6-6
圖 6.7 以單張POI影像為例之岸邊設施自動化辨識分析流程	6-7
圖 6.8 異變警示範例。藍點為碰墊缺失；綠點為碰墊損壞；黃點為車檔缺失；橘點為車檔損壞；紫點為反光版缺漏	6-8
圖 6.9 岸邊影像語意分割樣本標註範例(綠色為陸地；藍色為船隻；紅色為海)	6-8
圖 6.10 岸邊影像語意分割實際預測範例。原圖（左）；地真資料（中）；預測結果（右）	6-9
圖 6.11 UAV影像裁切後的感興趣區域範例	6-9
圖 6.12 感興趣區域縱切後的四份小照片範例	6-10
圖 6.13 岸邊設施Mask R-CNN辨識模型各項目的訓練損失	6-10

圖 6.14 岸邊設施Mask R-CNN模型辨識結果範例	6-10
圖 6.15 多時期比對結果範例（上）與其局部放大圖（下）	6-11
圖 6.16 北堤路設施偵測Yolov5模型表現。準確率（左上）；召回率 （右上）mAP@0.5（左下）；mAP@0.5:0.95（右下）	6-14
圖 6.17 北堤路設施偵測Yolov5模型混淆矩陣	6-14
圖 6.18 北堤路物件辨識成果	6-15
圖 6.19 Mask R-CNN難以有效偵測斜長形物件的物件輪廓，可見圖中 左邊藍色方框或右邊綠色方框	6-16
圖 6.20 減少道路標線跨幅後之影像，標註範例	6-16
圖 6.21 北堤路道路標線Mask R-CNN模型各項目損失	6-17
圖 6.22 北堤路道路標線Mask R-CNN模型偵測結果且合併成原圖	6-17
圖 6.23 路面分割學習曲線	6-18
圖 6.24 路面分割成果	6-19
圖 6.25 學習曲線	6-20
圖 6.26 路面辨識成果	6-20
圖 6.27 路面辨識成果於僅含路面之原圖	6-20
圖 6.28 資料集圖片與groundtruth	6-21
圖 6.29 本地資料集圖片與groundtruth	6-21
圖 6.30 學習曲線	6-22
圖 6.31 新增本地資料之路面辨識成果	6-23
圖 6.32 路面辨識成果於路面之原圖	6-23
圖 7.1 輕級裂縫	7-1
圖 7.2 中級裂縫	7-2

圖 7.3 重級裂縫	7-2
圖 7.4 裂縫密度計算流程圖	7-3
圖 7.5 圖解骨幹化	7-6
圖 7.6 骨幹化成果(紅色為放大的裂縫，綠色為骨架)	7-6
圖 7.7 圖解骨架正交法	7-7
圖 7.8 北堤路路況檢測成果	7-8
圖 8.1 臺中港南堤(a)第一期正射影像(b)第一期三維點雲	8-1
圖 8.2 臺中港南堤(a)第二期正射影像(b)第二期三維點雲	8-1
圖 8.3 臺中港南堤(a)第三期正射影像(b)第三期三維點雲	8-2
圖 8.4 臺中港南堤道路中心線位置圖	8-2
圖 8.5 臺中港南堤多時期斷面	8-3
圖 8.6 臺中港南堤多時期斷面差值	8-3
圖 8.7 南堤多時期水平位移差值	8-4
圖 8.8 Kaarta Stencil2光達感測器	8-5
圖 8.9 北防砂堤消波塊與堤防影像	8-6
圖 8.10 北防砂堤消波塊與堤防原始三維點雲	8-6
圖 8.11 AVG1000主機	8-8
圖 8.12 (a)煤堆光學影像(b)熱影像	8-8
圖 8.13 探針式溫度儀	8-9
圖 8.14 人工量測位置與溫度量測結果比較	8-9
圖 8.15 煤堆灑水影像示意圖	8-10
圖 8.16 植栽影像(左)與紅外線影像(中)與植栽位置框選(右)	8-11
圖 8.17 NDVIRir(左)、NDVIBir (中)、NDVIRGB (右)	8-12
圖 8.18 測試二植栽影像(左)與紅外線影像(中)與植栽位置框選(右)	

.....	8-13
圖 8.19 測試二 NDVIRir (左)、NDVIBir (中)、NDVIRGB (右).....	8-13
圖 8.20 (a)第一期北防沙堤影像 (b)第二期北防沙堤影像 (c)兩期套疊	8-14
圖 8.21 PhotoScan建模效果(左)與開源軟體建模效果(右).....	8-15
圖 8.22 臺中港區高精度正射底圖與量測防波堤寬度(紅線)	8-16
圖 9.1 (a)臺中港區無人機影像管理平台架構 (b)管理平台頁面	9-3
圖 9.2 量測工具頁面	9-4
圖 9.3 各不同量測模式成果	9-5
圖 9.4 UAV影片撥放及軌跡查看	9-5
圖 9.5 各飛行模式規劃成果示意圖	9-6
圖 9.6 飛行點位圈繪及規劃參數輸入	9-7
圖 9.7 規劃提示視窗	9-7
圖 9.8 路徑規劃查詢頁面	9-7
圖 9.9 規劃成果列表	9-8
圖 9.10 規劃成果查詢展示	9-8
圖 9.11 規劃參數結果查看.....	9-9
圖 9.12 UAV影像上傳頁面	9-10
圖 9.13 物件辨識成果列表	9-10
圖 9.14 UAV影像軌跡及涵蓋範圍圖	9-11
圖 9.15 點擊影像框後查看對應影像	9-11
圖 9.16 物件辨識成果影像	9-12
圖 9.17 設施物辨識列表	9-12
圖 9.18 原始辨識成果	9-13

圖 9.19 各期辨識成果	9-13
圖 9.20 路燈辨識影像	9-14
圖 9.21 北堤路路面破損評分展示頁面	9-14
圖 10.1 (a)案例1電量與飛行時間關係圖(b)飛行時間與距離關係圖	10-1
圖 10.2 (a)推估電量與飛行時間關係圖(b)推估飛行時間與距離關係圖 (2級風).....	10-2
圖 10.3 (a)案例2電量與飛行時間關係圖(b)飛行時間與距離關係圖	10-3
圖 10.4 (a)推估電量與飛行時間關係圖(b)推估飛行時間與距離關係圖 (5級風).....	10-4
圖 10.5 無人機設定航高與實際飛行航高對照圖	10-5
圖 10.6 無人機航高穩定性殘差圖	10-6
圖10.7 無人機水平位置穩定性殘差圖	10-6
圖 10.8 無人機現地巡檢圖	10-7
圖 10.9 無人機拍攝原始影像上呈現之港區斑馬線與雙白線圖	10-9
圖 10.10 (a)地形測繪之平台展示圖(b)google Earth結果圖	10-10
圖 10.11 影像匹配示意圖.....	10-11
圖 10.12 正射影像檢核用貨櫃圖	10-11
圖 10.13 長榮海運貨櫃尺寸表(來源:長榮海運官網)	10-12
圖 10.14 正射影像港區斑馬線與雙白線圖	10-13
圖 10.15 正射影像檢核物件位置分布圖	10-13
圖 10.16 港區控制點及檢核用貨櫃分布圖	10-15
圖 10.17 貨櫃高量測示意圖	10-16
圖 10.18 實際飛行測試拍攝內容	10-18

圖 10.19 (a)無人機測試起飛地點(b)無人機實際飛行畫面	10-18
圖 10.20 (a)單點環飛平台規畫飛路徑 (b) Mission Planner檢核飛行路 徑	10-19
圖 10.21 單點環飛Mavlink檔	10-19
圖 10.22 (a)多點巡航平台規畫飛路徑 (b) Mission Planner檢核飛行路 徑	10-20
圖 10.23 多點巡航Mavlink檔	10-20
圖 10.24 (a)地形測繪平台規畫飛路徑 (b) Mission Planner檢核飛行路 徑	10-20
圖 10.25 地形測繪Mavlink檔	10-21
圖 10.26 單點環飛路徑水平誤差	10-22
圖 10.27 多點巡航路徑水平誤差	10-22
圖 10.28 地形測繪路徑水平誤差	10-23
圖 10.29 跟隨無人機側向位移	10-24
圖 10.30 隨機檢核路段	10-25
圖 10.31 對照圖 左: 人工標註結果 右: 模型預測結果	10-28

表目錄

表 2-1 臺中港區地面控制點測量成果與精度表	2-4
表 2-2 影像資料蒐集基本資料表	2-6
表 2-3 中突堤UAV巡檢航線參數設定	2-11
表 3-1 民航局無人機證照與重量分級表	3-1
表 3-2 定翼機載具分級表	3-2
表 3-3 定翼機飛行總里程範例計算	3-4
表 3-4 定翼機不同安全係數飛行總里程計算	3-4
表 3-5 定翼UAV可搭載之光學相機規格表	3-6
表 3-6 定翼UAV可搭載之熱感應相機規格表	3-6
表 3-7 定翼UAV可搭載之光達規格表	3-7
表 3-8 定翼UAV可搭載感測器統整表	3-7
表 3-9 多旋翼機載具規格表	3-8
表 3-10 多旋翼UAV飛行總里程範例計算	3-10
表 3-11 多旋翼UAV不同安全係數飛行總里程計算	3-10
表 3-12 多旋翼UAV Type1、2可搭載之光學相機規格表	3-12
表 3-13 多旋翼UAV Type3、4可搭載之光學相機規格表	3-13
表 3-14 多旋翼UAV可搭載之熱感應相機規格表	3-13
表 3-15 多旋翼UAV可搭載之光達規格表	3-14
表 3-16 多旋翼機可搭載之感測器統整表	3-14
表 3-17 蒲氏風力級數與無人機最大抗風條件表	3-15
表 3-18 臺中港A區可飛行天數百分比表	3-20
表 3-19 臺中港B區可飛行天數百分比表	3-20

表 3-20 臺中港C區可飛行天數百分比表	3-20
表 3-21 臺中港D區可飛行天數百分比表	3-21
表 3-22 Type2多旋翼無人機設備五年使用維護攤提費用攤提計算價 表	3-22
表 4-1 無人機控制與取像參數設定對應表	4-9
表 4-2 引入之巡檢用無人機規格表	4-13
表 4-3 預估機體飛行任務效率	4-14
表 5-1 UAV飛行經緯度與海拔高度	5-2
表 5-2 UAV飛行旋轉角度與相機旋轉角度	5-2
表 5-3 POI編號262基期及改正影像中物件尺寸統計表	5-14
表 5-4 POI編號421基期及改正影像中物件長度統計表	5-15
表 6-1 本計畫目標物	6-3
表 6-2 岸邊設施Mask R-CNN辨識模型統計於驗證資料集之效能	6-10
表 6-3 無損壞的各目標物數	6-12
表 6-4 缺漏的各目標物數	6-12
表 6-5 損壞的各目標物數	6-12
表 6-6 北提路設施辨識成果	6-15
表 6-7 北堤路道路標線Mask R-CNN模型各目標mAP@0.5	6-17
表 6-8 模型在測試集上的表現	6-18
表 6-9 模型在測試集上的表現	6-20
表 6-10 模型在測試集上有無本地資料的表現比較	6-22
表 6-11 模型在原圖的表現	6-22
表 7-1 折減值計算表	7-4
表 7-2 修正折減值計算表	7-5

表 7-3 PCI等級對照表	7-5
表 8-1 臺中港南堤不同時期垂直（高程）之均方根誤差值	8-3
表 8-2 臺中港南堤不同時期水平位置之均方根誤差值	8-4
表 8-3 光達感測器分析適用項目	8-5
表 8-4 無人機光達感測器飛行參數	8-6
表 8-5 熱紅外感測器分析適用項目	8-7
表 8-6 熱紅外紅外感測器飛行參數	8-8
表 8-7 NDVI數值各區間代表意義	8-10
表 8-8 混淆矩陣	8-12
表 8-9 三種計算NDVI指標與真值的準確率與精確率	8-12
表 8-10 測試二，三種計算NDVI指標與真值的準確率與精確率 ..	8-13
表 8-11 兩方法建置沙洲模型規格與細節	8-15
表 8-12 防波堤寬度比較表	8-16
表 10-1 實際飛行數據表(2級風)	10-2
表 10-2 以實際案例推估飛行數據表（2級風）	10-3
表 10-3 實際飛行數據表(5級風)	10-3
表 10-4 以實際案例以實際案例推估飛行數據表(5級風)	10-4
表 10-5 建議飛行參數表統整	10-5
表 10-6 無人機飛行穩定度精度表	10-6
表 10-7 實際飛行位置精度表	10-6
表 10-8 貨櫃影像尺寸檢核表	10-14
表 10-9 斑馬線影像尺寸檢核表	10-14
表 10-10 雙白線影像尺寸檢核表	10-15
表 10-11 臺中港區DSM絕對高程檢核表	10-16

表 10-12 臺中港區DSM貨櫃高度檢核表	10-17
表 10-13 測試飛行參數	10-19
表 10-14 測試情境統整表	10-21
表 10-15 誤差統計表	10-23
表 10-16 修正折減值計算表	10-27
表 10-17 修正折減值計算表	10-27
表 10-18 兩模型誤差比較	10-28

第一章 前言

1.1 研究動機與目的

1.1.1 研究動機

臺中港為我國國際商港，為以近洋航線為主的中部區域加值型物流港，是主要能源、重工、石化原料進口港及油品儲轉中心，港區用地包括專業區、碼頭區、自由貿易港區等區域。臺中港務分公司，自85年度起即逐年委託辦理「臺中港區環境（污染源）調查監測分析」，以追蹤及評估臺中港區環境各項數據以建立背景資料，因此，每年需要編列巨額預算進行不同環境監測。近年來隨著無人飛行載具發展成熟，其具有高度的移動性以及遠距遙控功能，能夠取代人力，快速且輕易地到達過去不容易接近的區域。此外，其可搭載高解析攝影機，如同取代人眼，從空中的角度俯視地表，並將地表一切細節真實的紀錄在數值影像中而不遺漏。目前無人飛行載具結合影像技術已經廣泛應用於大範圍或特殊環境條件下的資料蒐集任務中。

另一方面，隨著數值影像與電腦視覺的發展，影像不單純只是用來記錄與提供視覺檢視，並可透過電腦處理程序與光譜分析，從影像中提取許多重要資訊，甚至自動化的進行特定物件的辨識與追蹤，此外，透過電腦視覺技術，可將二維平面影像轉換為具有空間坐標的三維資訊，若再輔以無人機導航定位或地表控制資料，更可提供地表物體精確的空間位置以及幾何資訊。本計畫將結合上述無人飛行載具影像技術之優勢，建立一套便利且能快速涵蓋大範圍港區地表資訊的蒐集技術，藉由開發合適的影像處理技術，對於所蒐集到的影像進行自動化的分析辨識並建立精確空間幾何資訊，妥善利用這些資訊建立港區土地利用狀況以及重要設施的監測管理機制，達到以創新科技提升管理效能的目的。

1.1.2 研究目的及重要性

港區使用單位以及使用名目繁多，相關之土地利用與規劃是港區營運的重要工作之一。然而港區幅員廣大，且人力有限，如何快速掌握各區域之使用狀況並妥善管理不易。另一方面，港區設施受海潮以及劇烈天氣狀況（如颱風地震等）衝擊影響之下，其穩定性與安全性備受考驗，同樣的在有限人力之下要能持續監測港區重要設施之安全穩定性並及早採取預防或補強措施，也成為一項難題。

因此，本計畫的目的為建立一套基於無人飛行載具以及影像分析技術的港區監測管理方案。未來利用此方案，將能以自動化方式掌握港區之使用狀況與異動，並針對重要設施進行監測，除可應用於港區土地之維護管理，並可更精確的掌握重要設施的穩定性，及早獲知可能的變動或破壞狀況，確保港區的營運安全。而計畫之成果，將能提供上述挑戰一實務解決方案，並在人力持續精簡化的長期趨勢之下，確保甚至提升港區的營運管理品質。

1.2 文獻回顧

1.2.1 傳統巡檢

巡檢可以確保設備資產的完整，並依據各項數據的變化或趨勢來安排後續檢查及維修保養工作，進而維繫應有效能並提升安全性，以本計畫的港區為例，不僅提供港區物流業者腹地，供其興建倉儲設施，亦搭配各國際商港港口區位，但由於腹地範圍包含陸地及部分出海口，為了管理之方便及維護各項設施的完整，巡檢工作的必要性和重要性因此備受重視。

然而，目前港區巡檢多以人工為主，透過巡檢人員攜帶巡檢紀錄表格進行巡檢作業，依據不同檢查類別將各自判定標準執行檢測診斷，而方法多為目視並依需求配合儀器進行詳細檢測，最後將結果根據量表記錄於表格上，然而這往往會造成20%至30%的錯誤率(Drury & Fox, 1975)。儘管現已有相關作業平台，仍必須花費人力將巡檢紀錄結果手動輸入電腦，無形中增加誤植的機率(See, 2012)。此

外，在有限的人力及預算下，無法經常性檢測各項目，而是使用定期檢測將分類依照輕重緩急歸類為年、季、月、周及日，許多設施發生問題無法及時處理。

近年來自動化巡檢觀念的興盛，相關技術已被套用在不同領域，自動化並非意味著人力的取代，相反的是巡檢流程結構的改變，將人力資源應用於更有價值的地方，讓機器從事繁複的任務減少紀錄及判斷錯誤，研究顯示這將提高結果可靠性和準確性(See et al., 2017)，對設施的安全維護提供重要幫助，也可使巡查次數更加頻繁，及時處理突發狀況。

1.2.2 UAV 發展與應用

無人機是一種無人駕駛飛行器，最初是在 20 世紀開發的，應用於軍事任務 (Tice, 1991)。，是一種不需要駕駛員的飛行控制器。無人機的系統還包括地面控制系統和一個與通訊系統。無人機的飛行可以在操作員的遠端控制下執行任務 (Hu and Lanzon, 2018)，同時降低了執行任務的風險。無人機也具有不同程度的自主權，例如自動航線飛行而無需人工干預 (Cary and Coyne, 2012)。隨著時代進步與無人機控制技術的改良和成本下降，現代化的無人機包含了電子陀螺儀、衛星定位系統 (GNSS)、慣性導航系統(IMU)和電傳飛控等 (Anderson, 2013)，比起早期無人機能使得飛行更穩定與靈活。在2000年代初期，由於無人機成本的降低和更多功能平台的可用性，大眾開始對無人機技術表現出更大的興趣。許多科學和工程界也深入研究無人機技術開發或將無人機納入各自領域(Greenwood et al., 2019)。

現今無人機的快速發展並隨著低成本與發展技術穩定的優勢，已被廣為應用於各個領域。在工程檢測方面，可檢測建築物外觀損壞程度，Escobar (2018) 透過搭載光學與熱像儀之無人飛機，計算放射率快速得知橋面裂縫潛勢位置，另外也有搭載光達進行檢測的方法 (Bolourian et al., 2017)。Tan and Li (2019) 透過無人機搭載光學影像配合偵測演算法進行道路三維破壞性監測。在營建工程方面，

應用無人機於工地現場之安全監測，特別針對人員無法到達之處，配合無人機查看，可評估危險之處 (Martinez et al., 2020)。在交通領域方面，應用於監視和監控、識別交通違規、幫助管理交通擁堵、信號優化和提取車輛軌跡以評估事故風險 (Menouar et al., 2017)。在測繪方面，無人機目前可取代部分傳統測量作業，如地形圖測繪，透過UAV拍攝影像可快速產製數值地形模型(Yeh et al., 2018)。在災害監測方面Ambrosia et al. (2013)評估在美國以UAV監測偏遠地區火災之可行性，Feng et al. (2015)運用機器學習演算UAV影像中淹水紋理資訊，進行淹水災害影像辨識。在農業應用方面，Radoglou et al. (2020)應用無人機於精準農業，以無人機監測與噴灑農藥於作物上。在許多文獻中顯現無人機的價值與應用優勢，包括測繪、精準農業、工程應用、巡檢基礎設施等，是現代多樣化應用任務之一大邁進方法。

1.2.3 影像技術發展與應用難度

影像測繪技術隨著時間不斷推陳出新，航空攝影測量領域也因此而受惠，記錄媒介從類比影像演進到數位元影像，許多在電腦視覺計算上的理論也逐漸被引進到數位攝影測量應用當中。結合無人機飛行拍攝，高機動性優勢條件提供如海(岸)上構造、邊坡崩塌等不易抵達區域進行影像蒐集，Colomina and Molina (2014) 以地理定位高解析影像經正射化、點雲資訊產製有效利用於空間環境監測。然而，當時序性影像執行環境變遷比較時，歷史拍攝影像易因缺乏地理定位參考資訊，需採用人工方式逐張比對辨識，大量影像人力辨識將降低監測效益。

欲建立兩張對於同一區域不同拍攝方位影像，需於影像中搜尋共同存在共軛點位(稱之為特徵點位)進行連結，其中連結方式可透過影像區域匹配(regional matching)和特徵匹配(feature matching)建構其關聯性。

區域式匹配透過預設罩窗匹配圖像獲得最佳特徵位置，例如，歸一化互相關匹配(Normalized Cross Correlation method, NCC)和最小

二乘匹配(Schenk, 1999)。Ye et al. (2017)在匹配計算過程中發現影像間比例和視角是否達到一致性而有所受限，Yang (2010)也針對搜尋罩窗大小設定差別，而成果顯著影響匹配操作運算效率。另外，特徵匹配主要透過影像中明顯變化處之梯度做為特徵標示，再藉由共同特徵間的鏈接距離篩選辨識是否為共軛特徵，例如，角、條紋、T形結(Rosten et al., 2008; Alcantarilla and Solutions, 2011)。Castillo-Carrión and Guerrero-Ginel (2017)、Zhang et al.(2018)和Zhao et al.(2019)分別應用常見特徵匹配如SIFT和SURF算法，提供圖像旋轉不變性優勢，有效輔助圖像偵測獲得共軛點。

影像對中找尋共軛特徵點主要可簡化成三個主要步驟：第一步在影像中找尋並選擇出特殊位置的點位，例如，角點、斑紋點、T字型交界點等等，此特徵偵測子(detector)有良好的重複性(repeatability)，使得儘管影像對在拍攝上的角度與條件不同，依舊能找尋到可能的特徵共軛點。檢測到特徵點後，接下來的工作便是對特徵點進行有效地描述，形成特徵向量。特徵描述子(descriptor)所描述的點要與眾不同，跟其他的特徵點有良好的區別度(distinctive)，對於雜訊、位移、幾何變形上也要有良好的抵抗性。最後利用特徵描述子向量所提供的資訊進行2張影像間的匹配。Lowe (2004)提出了scale-invariant feature transform (SIFT)演算法，在特徵點偵測時針對原影像，進行高斯平滑處理與再取樣的過程以形成影像金字塔，並檢測局部極值點集成SIFT候選特徵點，再依序將對比度的點位元與位元於影像邊緣的點位元予以剔除，最後以一128維的向量記錄每一特徵點的特徵描述子。Bay et al. (2008)提出了加速穩健特徵(speeded up robust features, SURF)演算法希望藉由其對於演算過程中的革新，改良SIFT演算法在使用上所產生的缺點，包括先前所提到計算效率會與特徵描述子的維度有著絕對的關係，以及在建立尺度空間上的效能與資料流失，因此，利用積分影像(Integral image)與簡化的box filter來建立尺度空間，此外，在特徵描述子上引入了Haar小波的方式來計算，簡化了原先在SIFT演算法中特徵描述子的維度。Juan and Gwun

(2009)的研究中假使對於影像做了旋轉、平移、仿射轉換等等改變，對於SIFT與SURF兩種方法進行了比較，成果顯示，SURF演算法於運算時間及明亮度偵測因素，具備穩定運算優勢。

透過拍攝影像中顏色可觀察到目標物屬性特色，然而，外在光源條件如天氣、日夜等變化將使成像特徵顏色有所差異，因此，過去研究採用的策略大致可分為兩種，其一是以紅-綠-藍空間(RGB space)為基礎，計算目標顏色在整幅影像中的相對灰階值大小以做為二值化依據(Soheilian et al., 2013)；另一種方法為Hearn (1986)提出以RGB色彩模型基礎，透過非線性轉換，建構色相-飽和度-明度空間(Hue Saturation Value, HSV)轉換模型，利用色相與飽和度對同樣顏色的穩定性，決定不受光照環境影響的門檻值(Jau et al., 2008)。

影像匹配豐富應用於各影像類別，如近距離攝影、航拍圖像及車輛辨識(Liu et al., 2011; Shan et al., 2014; Malik and Siddiqi, 2014; Li et al., 2015)，此外Tsai and Lin (2017)和Zhuo et al. (2017)指出現行無人機影像匹配偵測多建立於已知位置或飛行高度，其中圖像比例大小與旋轉為特徵偵測之效率產生巨大影響。因此，透過無人機影像匹配技術發展，將凸顯空間鏈接與實現時序性監測研究價值。

1.3 工作項目與流程

本計畫為2年期計畫，各年度主要工作項目及內容分述如下：

1.3.1 第一年度(110)

(1) 無人飛行載具以及影像感測器硬體系統分析

依據本工作環境條件、任務需求，分析評估最適當之無人飛行載具以及影像感測器硬體組合，並設定特定情境進行營運成本分析。

(2) 飛行載具控制與取像邏輯分析

藉由設定欲監測之目標、載具飛行模式，透過路徑演算法預先規劃載具飛行路徑，並顯示載具之飛行路徑、取像位置、影像涵蓋區域、與目標之相對位置關係，建立自動化控制載具之飛行任務規

劃，降低人為控制影響，以達到重複性之飛行任務一致性，再利用取像參數之細部調變分析，修正飛行任務，建立以符合任務需求且最有效率之載具路徑控制，以及最佳取像位置邏輯判斷。

(3) 自動化影像三維建構與空間資訊賦予

引入適當之影像處理以及電腦視覺技術，建立自動化立體建構技術，賦予影像中各點位之精確三維空間坐標值，利於後續判斷分析。

(4) 特定物件辨識以及變遷偵測分析技術

建立多時期影像匹配技術，以偵測影像位置並改正視角差異，並藉由不同時期成果比較，判定物件變遷行為。

(5) 品質評估與行動依據

評估整體工作流程所得成果之精度，並以實地觀測成果進行品質驗證，做為後續管理決策行動建立參考依據。

1.3.2 第二年度(111)

(1) 基於無人機影像之智慧化分析研究

針對特定任務需求，利用無人機影像或相關圖資，研發基於機器學習之智慧化分析模組，例如，海面油污辨識與定量追蹤，港區交通流量管理，或綠帶生長情形定性與定量研判等。

(2) 新式感測器之引入與可應用性研究

一般無人機搭載之可見光僅侷限於日間光線良好時使用，透過新式感測器之引入（如熱紅外成像儀或三維雷射掃描儀等），以強化空間資訊之蒐集能力，並探討其可應用範圍（如夜間人員、移動車輛、船舶或熱氣排放之辨識與追蹤等）。

(3) 基於無人飛行載具影像資料之空間資訊整合平台架構

依據港區環境條件、例行管理或特殊任務需求，建立無人機影像為基礎之空間資訊平台架構，並引入相關空間圖資，評估整合平

台所成達成之管理效能。

(4) 品質評估與行動依據

評估整體工作流程下所得成果之精度，並以實地觀測成果進行品質驗證，做為後續管理決策行動建立參考依據。

第二章 基礎資料蒐集分析

2.1 基於 UAV 影像技術之空間資訊建構

UAV搭載相機拍攝影像時，相機與場景具備空間與方位特性，可以由內方位(Interior orientation)與外方位(Exterior orientation)表示，其中內方位參數描述以相機主體及影像為主，包含像主距(Focal length)、像主點偏移量、透鏡畸變參數等，這些參數可利用相機率定方式，於影像拍攝前獲得資訊；外方位參數描述相機於空間中位置及角度，以透視投影中心之空間位置參數(X_L 、 Y_L 、 Z_L)與三軸姿態參數(ω 、 ϕ 、 κ)(圖 2.1)，建構拍攝時物像空間幾何，並以共線方程式(Collinear equation)(式(1))示之，透過空間後方交會(Resection)解算獲得外方位參數。

$$\begin{aligned} x - \Delta x &= -f \frac{m_{11}(X - X_L) + m_{12}(Y - Y_L) + m_{13}(Z - Z_L)}{m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)} \\ y - \Delta y &= -f \frac{m_{21}(X - X_L) + m_{22}(Y - Y_L) + m_{23}(Z - Z_L)}{m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)} \end{aligned} \quad (1)$$

其中(x, y)為像點坐標， Δx 、 Δy 為內方位改正項，包含像主點偏移量、透鏡畸變差， f 為像主距， $m_{11} \sim m_{33}$ 為構成旋轉矩陣之各元素，(X_L, Y_L, Z_L)為透視投影中心的坐標，(X, Y, Z)為物點坐標。

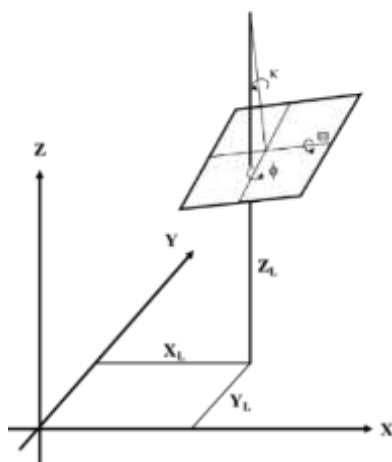


圖 2.1 物像空間幾何關係圖

搭載的相機存在透鏡畸變差，透過自率光束法(self-calibrating bundle adjustment)彈性且快速修正優勢(Remondino and Fraser, 2006)，以連續重疊影像於空中三角平差計算中求解內方位參數及物點坐標，同時由修正量及修正像主點偏移、輻射畸變差與離心透鏡畸變差等問題，其修正式如式(2)所示。

$$\begin{aligned}\Delta x &= -\Delta x_0 - \frac{x_i}{f} \Delta f + k_1 x r^2 + k_2 x r^4 + k_3 x r^6 + p_1 (r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy \\ \Delta y &= -\Delta y_0 - \frac{y_i}{f} \Delta f + k_1 y r^2 + k_2 y r^4 + k_3 y r^6 + 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2y^2)\end{aligned}\quad (2)$$

其中的八參數包含像主距修正量 Δf 與像主點偏移量 Δx_0 、 Δy_0 ，輻射透鏡畸變差參數 K_1 、 K_2 、 K_3 ，離心透鏡畸變差參數 P_1 、 P_2 ， r 為像點與像主點之距離。

由已知內方位參數與三個以上不共面的地面控制點(Ground control point)，解算得影像之外方位參數(Mikhail *et al.*, 2001)，可透過多張影像前方交會定義像點之物空間坐標值，完成空間幾何於絕對方位(Absolute orientation)系統中分布(Heipke, 1997)；亦可以透過UAV搭載簡易GNSS定位接收器，粗略定義透視投影中心拍攝位置，進而解算相機三軸姿態。當內、外方位參數初值已知，利用連續拍攝影像進行運動獲取空間結構(SfM)分析(Tomasi and Kanade, 1991)，以SURF特徵匹配技術取得共軛點連結多重影像，以核面幾何推估與修正相機位置，再由共線式進行光束法平差分析，迭代修正內、外方位參數並重構物空間幾何，其建構流程如圖 2.2所示。

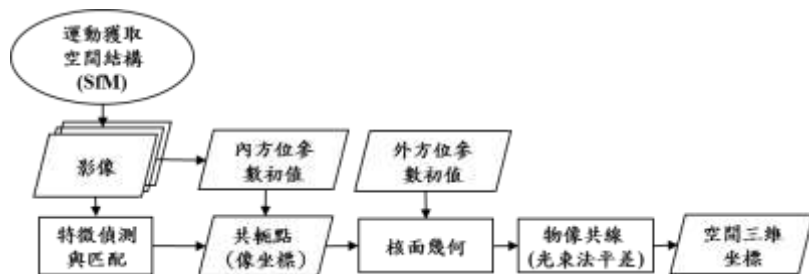


圖 2.2 SfM 空間資訊建構流程圖

透過共線式求解影像的內、外方位參數，進一步計算影像重疊

區之數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，再以DEM空間資訊產製正射影像。製作正射影像目的，在於移除拍攝時因透視投影及透鏡畸變差產生地物變形，一般而言製作正射影像可分為倒投影及重新取樣(resampling)兩大部分，倒投影示意如圖 2.3，DEM上物點P、透視中心以及影像上像點p三點共線，在物點坐標、相機的內、外方位參數為已知條件，透過式(1)以倒投影方式，求解對應影像坐標，倒投影方式為線性方程式，不需經過迭代直接計算影像坐標。影像資訊依倒投影格網分布，以內插方式進行重新取樣填入，避免像片坐標不為整數問題。重新取樣方法建立於高重疊率影像條件下，盡可能保留原始影像資訊，完成正射影像製作。

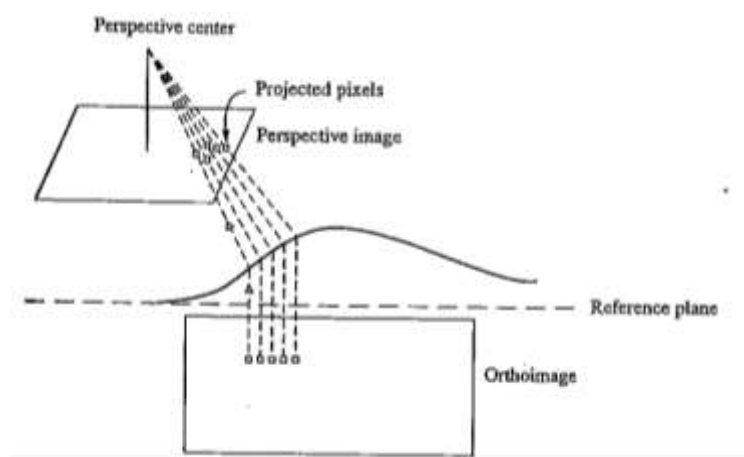


圖 2.3 正射影像倒投影(Mikhail et al., 2001)

2.2 臺中港區空間資料蒐集與建構

2.2.1 控制點測量

控制測量作業採用GNSS靜態量測方式獲取三維空間資訊，本計畫於臺中港區共施測16個地面控制點，並採用臺中港一等衛星連續追蹤站TACH做為約制基準，共同聯測達40分鐘以上。經使用MAGNET Tools衛星定位基線解算軟體，並加入衛星精密星曆，再透過該軟體平差解算後，獲得測站之高精度三維坐標成果，同時提供三維坐標後驗精度，該精度差異為現地衛星觀測時，可能受到多種因素影響，例如網型、遮蔽角、衛星幾何分布等。控制點分布如圖 2.4所示。表 2-1為測量成果與精度，此精度為衛星網型解算後，透

過軟體內建平差方法所估計各個點位之精度。其平面精度達 ± 0.6 公分，高程精度達 ± 1 公分，優於本計畫所設定平面 ± 2 公分高程 ± 5 公分之需求。



圖 2.4 臺中港區地面控制點與基線分布圖

表 2-1 臺中港區地面控制點測量成果與精度表

點號	縱坐標 (m)	橫坐標 (m)	橢球高 (m)	正高 (m)	高程精度 (m)	平面精度 (m)
TACH	2687312.357	202810.418	33.793	15.041	-	-
TP01	2689675.952	202050.486	23.829	5.168	0.006	0.004
TP02	2688907.761	203647.390	23.549	4.803	0.004	0.003
TP03	2687519.287	204220.450	23.911	5.110	0.003	0.002
TP04	2687220.221	200934.204	22.183	3.523	0.002	0.002
TP05	2686004.906	202771.865	23.064	4.292	0.005	0.003
TP06	2683517.914	201749.579	23.220	4.481	0.009	0.006
TP07	2682535.014	200242.816	23.794	5.095	0.005	0.003
TP08	2680734.793	200537.762	24.006	5.282	0.006	0.004
TP09	2680209.661	199282.845	23.876	5.203	0.006	0.005
TP10	2678145.196	197359.104	24.433	5.810	0.008	0.006
TP11	2679032.276	195521.533	23.932	5.381	0.017	0.010
TP12	2681723.685	196561.201	29.500	10.947	0.015	0.007
TP13	2683454.603	198557.167	23.167	4.557	0.014	0.007
TP14	2684714.113	199262.772	22.899	4.275	0.003	0.002
TP15	2686807.186	199524.408	24.042	5.436	0.002	0.002
TP16	2687767.314	201070.195	23.451	4.795	0.002	0.002
RMSE	-	-	-	-	0.010	0.006

2.2.2 影像資料蒐集

臺中港區幅員廣大，本次施測面積包含臺中港陸域及部分水域，面積共約為5,000公頃，全案以多個視角蒐集全臺中港測區影像，其基本資料如表2-2所示，以航高為120m共計飛行25條航帶，涵蓋所有地面控制點，每個控制點至少涵蓋兩條航帶，圖 2.5為本計畫影像拍攝點位分布，採用VTOL定翼機進行拍攝，拍攝時間共計三天完成。相機型號為Phase One-iXU-RS1000，每一位位置同時拍攝5張影像，總計拍攝8885張影像，單張影像原始解析度寬11608×高8708。影像重疊率如圖 2.6所示，符合縱向達80%、橫向達60%之標準，基本資料表如表2-2所示。

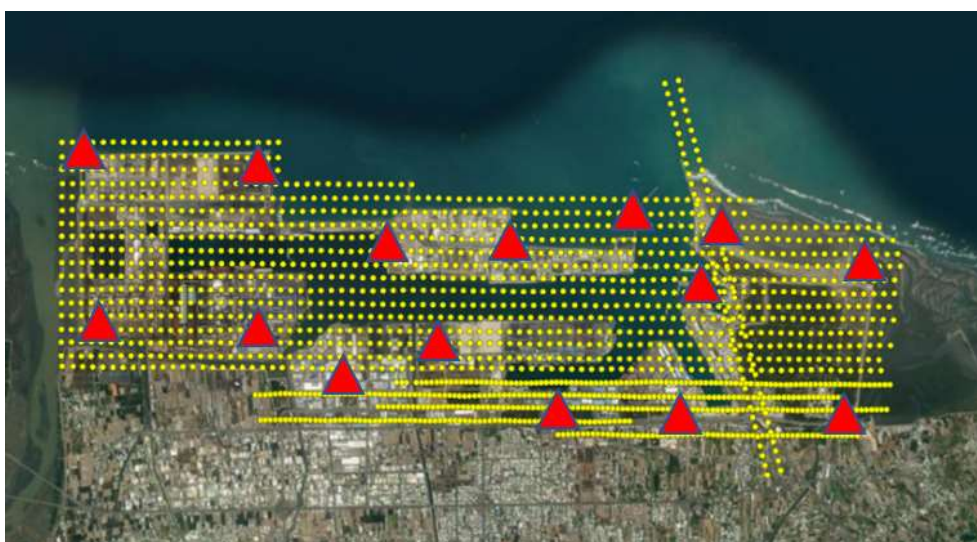


圖 2.5 航帶範圍與控制點分布圖

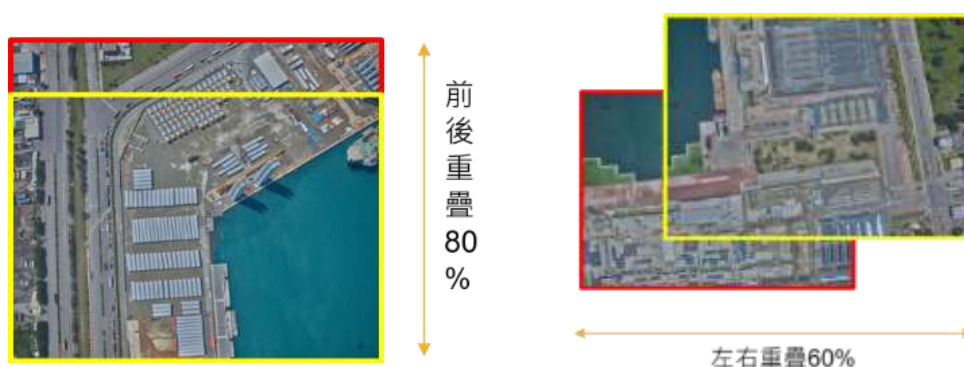


圖 2.6 影像拍攝重疊率

表 2-2 影像資料蒐集基本資料表

項目	內容
無人機	VTOL 定翼機
航高	120m
航帶數量	25 條
航線間距	65m
影像數量	8885(每一位置五張)
重疊率	縱向重疊 80% 橫向重疊 60%
單張影像大小	寬 11608×高 8708

2.3 數值地形模型成果

數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)是採用影像匹配產製點雲製作而成，以數字的形式來表示實際地形特徵的空間分布，再製作精確之數值高程模型資料，能確實反應實際地形面起伏情形，每一個影像網格皆具有高程資訊。另關於數值地形模型中水位資料，本計畫依據海軍大氣海洋局公告105年至110年潮汐表，計算潮位資料，使用海軍潮位資料是為了計算平均潮位，再將平均潮位轉換至正高系統。如此才能整合水域與陸域為相同TWVD2001系統。如圖 2.7計算近六年平均潮位為3.089m，再依據中央氣象局臺中港潮位資料，對應至平均潮位高(正高)為0.096m，此高程是相對於TWVD2001高程基準，此平均潮位高將用於修正DSM水域高程資料，數值地形模型成果如圖 2.8所示，空間解析度達10cm。



圖 2.7 臺中港區 105 年至 110 年平均潮位圖

(海軍大氣海洋局潮汐表計算)

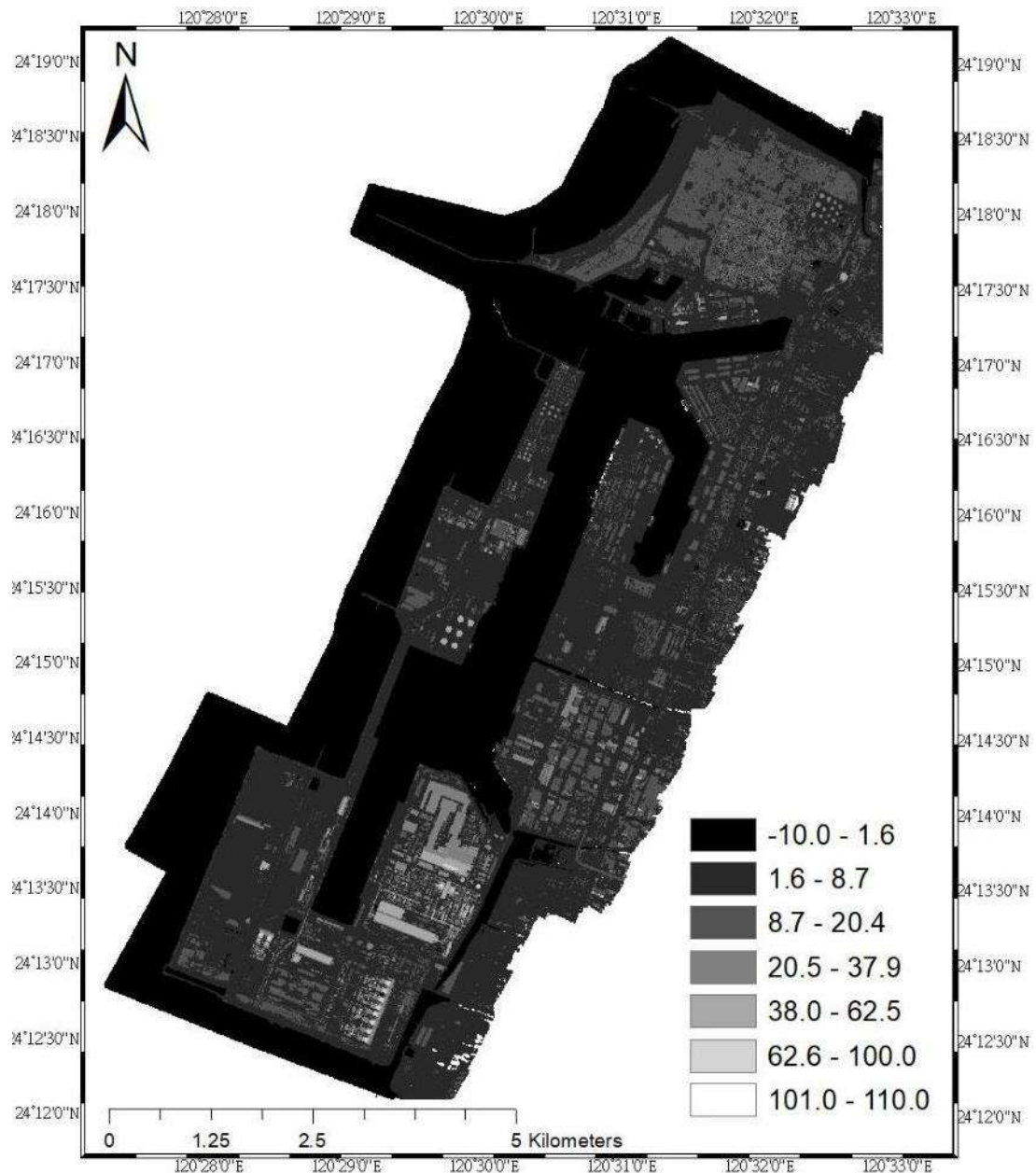


圖 2.8 臺中港數值地形圖

2.3.1 臺中港區高解析度正射影像成果

正射影像產製基於數值地形(DTM)三維地表變化，再根據影像幾何，由共線式描述投影中心、影像、與地面點的關係，配合數值進行正射糾正，可求得DTM每個一個物點(X,Y,Z)在影像上的坐標(x,y)，根據影像點上之灰度值而倒投影填入原物點網格，每一個影像網格皆具有地理坐標資訊。正射影像成果如圖 2.9所示，再由圖 2.10(a)與圖 2.10(b)經實際驗證，影像解析度達5cm。

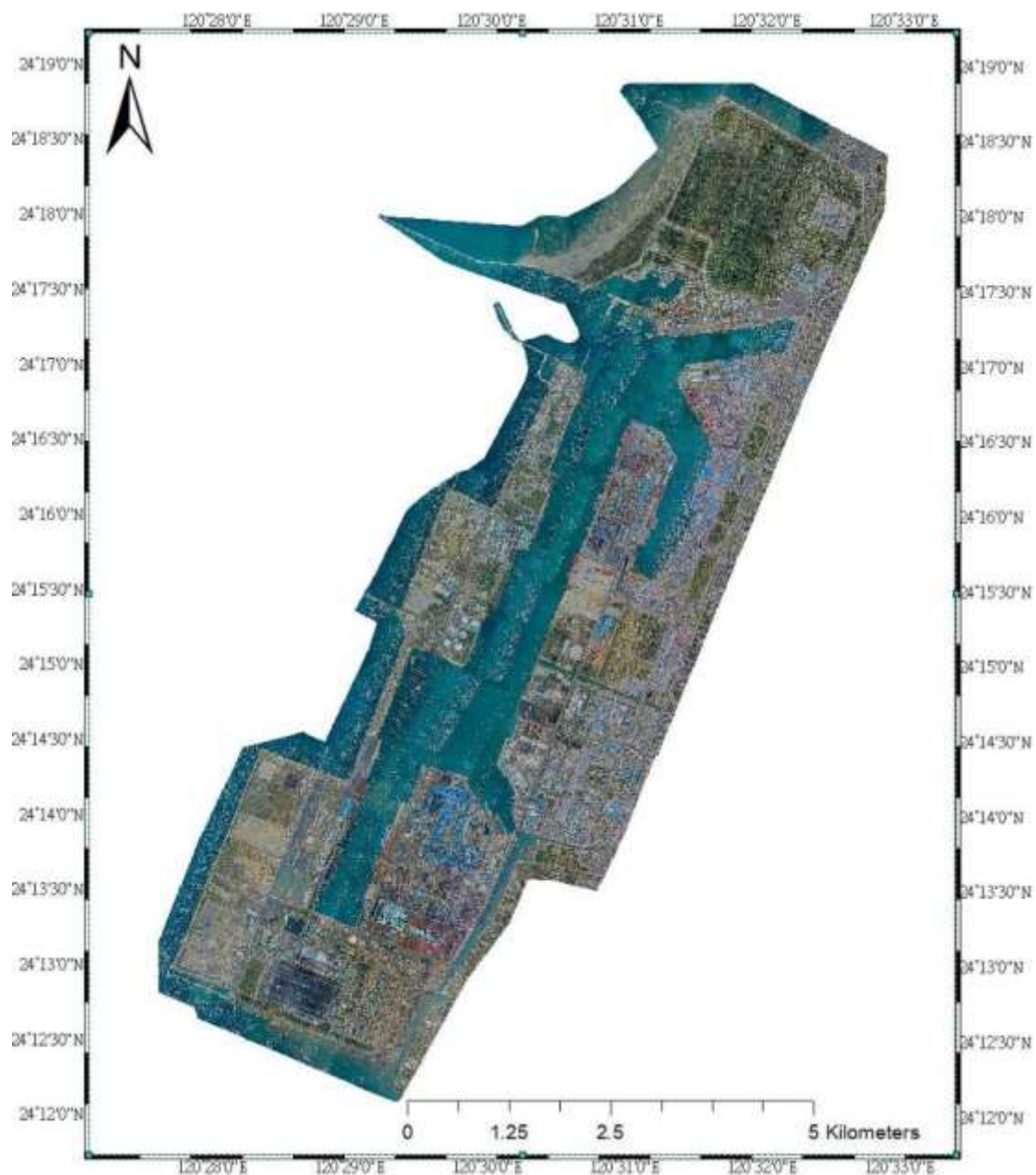
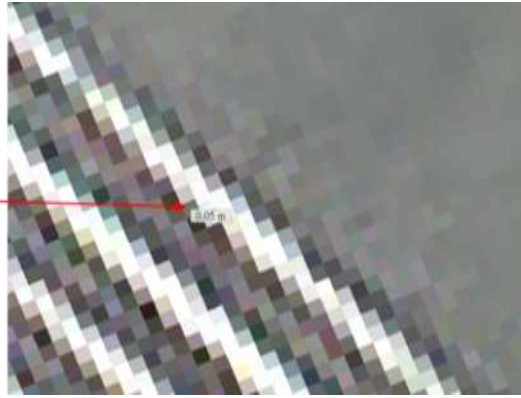


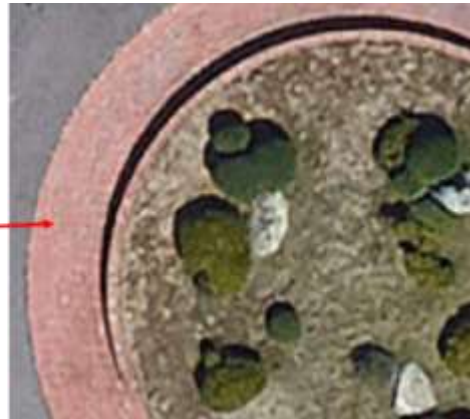
圖 2.9 臺中港區高解析正射影像圖



(a)



(b)



(c)



(d)

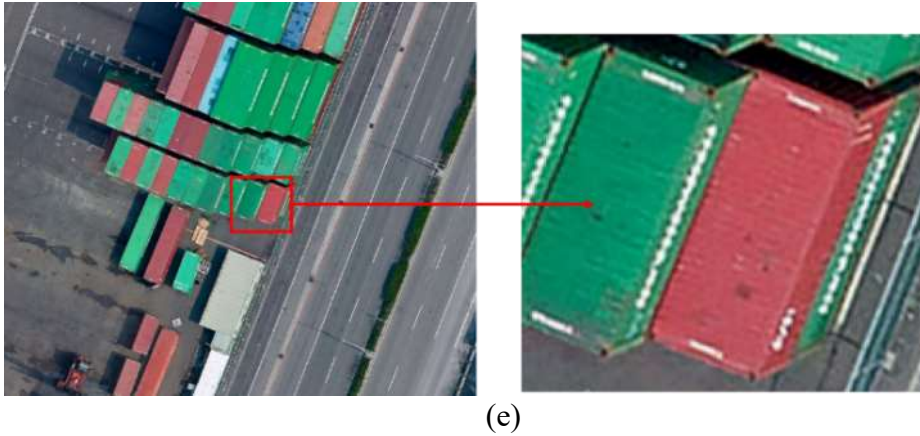


圖 2.10 臺中港區正射影像解析度展示圖

2.4 影像資料蒐集標準化

2.4.1 中突堤巡檢影像參數

中突堤為本計畫之固定巡檢路線，其中影像獲取是依據POI位置所決定。如圖 2.11系統平台上每個POI點位間距為11公尺左右，故無人機在進行拍攝任務時，影像拍攝之間隔不得大於11公尺。本計畫建議執行任務時，設定每間格5公尺(坐標水平位置)，拍攝一張影像，這樣的影像頻率才足以確保每個POI皆有影像資料。鏡頭角度45度為最佳取像角度，能完整拍攝碼頭設施。另在航高以及離岸距離部分，由於停靠港口之船舶最高高度可達30~40公尺，寬度可達20~30公尺，為了避免發生無人機擦撞事故，建議將離岸航線為40公尺遠，離岸航高為40公尺高，另相關參數設定如表 2-3。



圖 2.11 中突堤系統平台 POI

表 2-3 中突堤 UAV 巡檢航線參數設定

項目	參數	備註
拍攝頻率	1 張/5m	滿足每個 POI 資料
拍攝角度	45 度	拍攝完整碼頭設施
航高	40 公尺	避免碰撞船舶
航線離岸距離	40 公尺	避免碰撞船舶

2.5 本章小結

關於基礎資料蒐集，本計畫進行了地面控制點測量與全港區影像資料蒐集，透過精確的地面控制點配合攝影測量原理進行影像建模，產製高精度與高解析度之正射影像底圖與數值高程模型，在影像上每個像素皆具有精確之空間資訊，後續將有效應用於港區巡檢以及影像對位等相關任務。

第三章 無人飛行載具以及影像感測器硬體分析

3.1 無人機載具種類性能與感測器分析

3.1.1 定翼機性能與搭配感測器分析

(1) 載具類型

定翼機獲得的升力是來自於空氣相對機翼的作用力所提供。因此執行任務時，不容易在天空停留，必需持續的前進。載具的推力則使用螺旋槳推進，或是噴射引擎提供。此外，定翼機的大小，決定了飛行的時間與範圍，也影響著能酬載的重量大小，更重要的是影響著飛行的穩定性。因此，本計畫針對定翼機的重量進行分析，如表 3-1所示，依據民航局遙控無人機管理規則進行分類。此外，為了方便說明，本計畫將不同級別的無人機以Type1至Type4呈現。另專業高級操作證又可分為3種，分別為G1,G2,G3。這3種分別代表不同功能之證照，依據排除不同條件限制進行分類。G1為夜間飛行，以及地面或水域400尺區域已上飛行。G2為投擲或噴灑物件。G3為人群聚集地或遊行上空活動。

表 3-1 民航局無人機證照與重量分級表（整理自交通部遙控無人機管理規則）

旋翼無人機	定翼無人機	重量	個人休閒娛樂用、無涉例外限制排除	執行政府機關(構)、學校或法人業務 (得執行例外限制排除項目)	專業高級排除條件限制
本計畫代稱					
Type1	-	未達 2kg (250g 以下)	免操作證	1a(未逾 2 公斤註記) (高級專業操作證)	G1-夜間飛行。地面或水域 400 尺區域已上飛行 G2-投擲或噴灑物件 G3-人群聚集地或遊行上空活動
Type2	Type1	未達 2kg (250g-2kg)			
Type3	Type2	2 公斤以上、未達 15 公斤(裝置導航設備)	普通操作證 (學科測驗)		
Type4	Type3	15 公斤以上、未達 25 公斤	同基本操作證 (學、術科測驗)	1b (高級專業操作證)	
-	Type4	25 公斤以上、未達 150 公斤		1lc (高級專業操作證)	

本計畫將定翼機依照重量分為四個類別，如圖 3.1與圖 3.2所示為Type1、Type2、Type3、Type4，再以表 3-2比較不同級距無人機之差異。Type1重量為250克-2公斤，屬於較輕量型的定翼機，這個級別中較具代表性的機種為eBee X Fixed，具有高度穩定性，且可投擲飛行。在Type1大部分的機種可飛行時間約為45-60分鐘，單次飛行範圍約500公頃，常見用於地形測繪與巡檢飛行。Type2重量為2公斤-15公斤，如本計畫使用VX2300新式固定翼混合動力無人機，以旋翼的方式垂直起降後再變形為定翼飛行，不受限於地區影響。在Type2大部分的機種可飛行時間可飛行時間約為60-120分鐘，單次可飛行範圍約1500公頃，航高可達4000m。Type3重量為15-25公斤，如Quantum-Systems Tron F90+同樣也是新型固定翼混合動力無人機，可飛行時間與飛行範圍皆與Type2相同，但抗風性與載重能力優於Type2。Type2與Type3是目前是最為被廣泛使用的無人機，包含了續航力佳、載重佳，與體積適中等優點。常見的光達學雷達儀皆載重於此機型上。Type4重量為25公斤以上，如臺灣國產研發新式Sky Arrow 55，具有超長飛行時間達120分鐘以上，航高可達4000m。單次飛行範圍是最大的機種，同時也能負載較重的儀器，在抗風性的表現上也最為優秀，常用於執行特殊任務，或氣象資料蒐集等用途。

表 3-2 定翼機載具分級表

項目	Type1	Type2	Type3	Type4
重量	250 克-2 公斤	2 公斤-15 公斤	15 公斤-25 公斤	25 公斤以上
翼展	1m 以下	1.5m -2m	2m - 2.5m	2.5m - 3m
最大航高	500m	4000m	4000m	4000m
飛行時間	45 – 60 分鐘	60 – 120 分鐘	60 – 120 分鐘	120 分鐘以上
單次飛行範圍	500 公頃	1500 公頃	1500 公頃	3000 公頃
抗風	6 級風	6 級風	6-8 級風	6-8 級風
酬載重量	200 克以下	1.5 公斤以下	5 公斤以下	6 公斤以下
用途	1.地形測繪 2.巡檢飛行	1.地形測繪 2.巡檢飛行	1.地形測繪 2.大範圍巡檢飛行	1.地形測繪 2.大範圍巡檢飛行 3.氣象資料蒐集



(a)



(b)

圖 3.1 (a)Type1e 定翼機 Bee X Fixed (b)Type2 定翼機 VX2300



(a)



(b)

圖 3.2 (a)Type3 定翼機 Quantum-Systems Tron F90+ (b)Type4 定翼機 Sky Arrow

(2) 飛行里程計算

港區範圍幅員廣大，因此對於載具的飛行里程，需進一步納入考量，以利後續相關應用能快速評估適用性。然而影響著飛行里程的首要條件為無人機電池續航時間，目前原廠公告的無人機續航時間，是在理想情況下，天候狀況良好時，無人機原廠提供的飛行範圍如圖 3.3。然而，考量到本計畫位於氣候條件不佳的港區，需再將電力總飛行時間乘上安全係數。目前常見的安全係數為0.7。此安全係數為本計畫根據天候狀況進行調整。接著就是透過總飛行時間來計算里程，如表 3-3所示，以Type2作為範例，在0.7安全係數的考量下飛行總里程為113.4km。透過表 3-4，估計所有種類的無人機在安全係數下的飛行總距離，再以圖 3.4視覺化呈現預估飛行範圍。

表 3-3 定翼機飛行總里程範例計算

項目	數值
原廠公告飛行時間	90 分鐘
乘上 0.7 安全係數飛行時間	60 分鐘(3780s)
飛行航高	120m(本計畫最大航高)
飛行速度	30m/s(原廠最佳巡航速度)
飛行總距離	$30\text{m/s} \times 3780\text{s} = 113.4\text{km}$

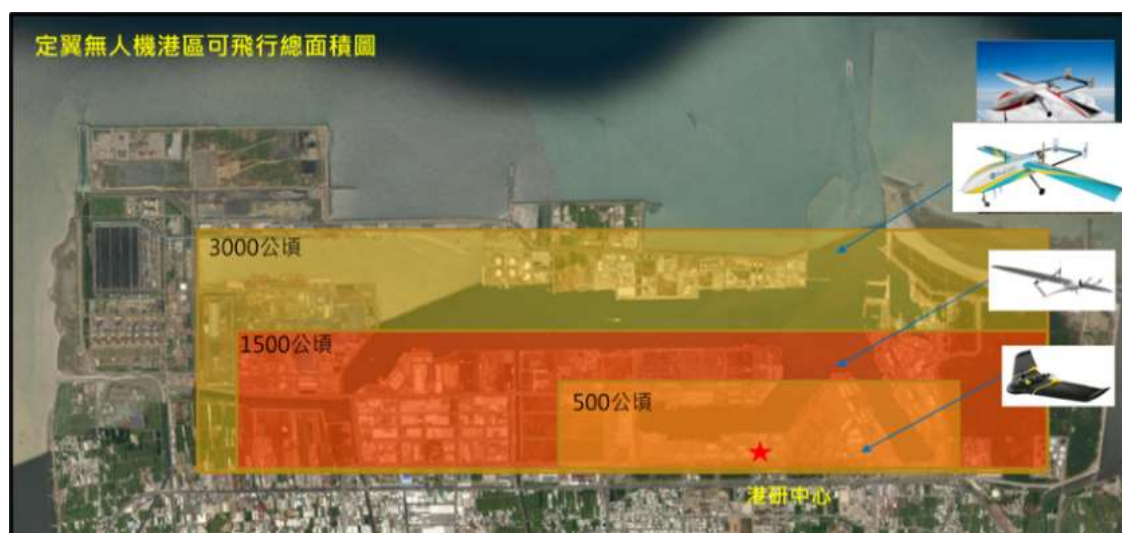


圖 3.3 定翼機最大飛行範圍圖（以港研中心為中心）

表 3-4 定翼機不同安全係數飛行總里程計算

安全係數	Type1	Type2	Type3	Type4
$\times 0.7$	38km	113km	113km	151km



圖 3.4 定翼機安全係數 0.7 飛行面積範圍圖（以港研中心為中心）

(3) 感測器分析

定翼機具有體積大，航行穩定的優勢，因此所能酬載的感測器較為廣泛，目前常見的包含光學相機、熱感相機、光達。首先為光學相機，主要用於拍攝可見光影像，提供後續影像辨識、影像分類等分析用途，光學影像解析度越高，所獲得的影像資訊越多。如表 3-5 所示為光學相機的主要規格，在 Type1 部分，無人機重量較輕，酬載約在 500g 以下，因此大部分多為模組鏡頭，較難搭載高解析度規格的相機，解析度主流為 5472x3648。在航高 120m 時可達到 3.3cm/pixel 的地面解析度。另一方面，Type2,3,4 的部分，隨著可搭載較重的酬載，重量約為 5kg 以下，相機的規格也隨之提升，解析度可高達 9504x6336，於航高 120m 時地面解析度可達 2.3cm/pixel。

第二種感測器為熱感應相機，能對於物體散發出的紅外線，進行感光成像，經常用於溫度檢測。如表 3-6 所示，各種類型的無人機皆有熱像鏡頭模組，或可替換式鏡頭模組，解析度主流規格為 640x512，在航高 120m 時地面解析度可達 28.1cm/pixel。

第三種感測器為光達，為雷射發射器所發出的脈衝雷射光，由載具射出至地面上，打到植生或建物後引起散射和反射。一部分光波會經由反向散射返回到載具上的接收器中，將光信號轉變為電信號記錄下來，例如用於紀錄大範圍地貌三維空間資訊。如表 3-7 所示，光達依據雷射照射的範圍，可分為三種：(1) 360° 全視野照射，航高

120m點密度為150pts/m²，約為50~70萬元(2) 46°向下視野，航高120m點密度為300pts/m²。約為70~100萬元(3) 100°半視野，航高120m點密度為680pts/m²約為100~150萬元。本計畫將三種感測器與不同類型無人機整合於表 3-8，依照需求選擇適用的無人機機型與感測器。

表 3-5 定翼 UAV 可搭載之光學相機規格表

光學相機	Type1	Type2,3,4
		
型號	senseFly S.O.D.A.	SONY A7RIV A7R4A
種類	模組鏡頭&可替換式鏡頭	模組鏡頭&可替換式鏡頭
像素	1600 萬畫素	6100 萬畫素
解析度	5472x3648	9504 x 5344
感光元件	1 英吋 CMOS	1 英吋 CMOS
相機重量	500 克以下	5 公斤以下
航高 120m 地面解析度	3.3cm/pixel	2.3cm/pixel

表 3-6 定翼 UAV 可搭載之熱感應相機規格表

熱感應相機	Type1	Type2,3,4	Type2,3,4
			
型號	senseFly S.O.D.A.	FLIR A65	HD40
種類	模組鏡頭&可替換式鏡頭	可替換式鏡頭	模組鏡頭
解析度	640x512	640x512	640x512
相機重量	500 克以下	500 克以下	1 公斤以下
航高 120m 地面解析度	28.1cm/pixel	28.1cm/pixel	28.1cm/pixel

表 3-7 定翼 UAV 可搭載之光達規格表

光達	Type2,3,4		
			
型號	RIEGL miniVUX-3UAV	RIEGL miniVUX-1UAV	RIEGL VUX-120
種類	全視野	向下視野	半視野
雷射脈衝頻率	100 kHz	1.8MHz	1.8MHz
測量頻率	200,000 次/秒	1,00,000 次/秒	1,500,000 次/秒
掃描速度	100 次掃描/秒	150 次掃描/秒	400 次掃描/秒
精度	$\pm 2\text{cm}$	$\pm 2\text{cm}$	$\pm 2\text{cm}$
FoV	360°	46°	100°
重量	1.55 公斤	2.4 公斤	2 公斤
航高 120m 點密度	150pts/ m^2	300pts/ m^2	680pts/ m^2

表 3-8 定翼 UAV 可搭載感測器統整表

類型	光學相機	熱感應相機	光達
用途	1.巡檢拍攝 2.一般監測 3.大範圍地形測繪	溫度檢測	大範圍三維空間資料蒐集
Type2	可掛載、可替換 GSD: 3.3cm/pixel	可掛載、可替換 GSD: 28.1cm/pixel	可掛載、可替換 點密度: 150pts/ m^2
Type3	可掛載、可替換 GSD: 2.3cm/pixel	可掛載、可替換 GSD: 28.1cm/pixel	可掛載、可替換 點密度: 300pts/ m^2
Type4	可掛載、可替換 GSD: 2.3cm/pixel	可掛載、可替換 GSD: 28.1cm/pixel	可掛載、可替換 點密度: 680pts/ m^2

3.1.2 旋翼機性能與搭配感測器分析

(1) 載具類型

多旋翼機是由多個旋翼動力組所組成的飛行器，亦具有垂直起

降的功能。根據載台的酬載與滯空能力，可隨時改變飛行的速度、高度及方向，其機動性相對較高，具備垂直起降及停懸的能力，適合地表起伏變化較大的區域。針對多旋翼無人機的重量進行分析，依據民航局所設定多旋翼無人機重量與證照分級規範標準分成Type1、Type2、Type3、Type4四個類別，其規格見表 3-9，範例見圖 3.5及圖 3.6。Type1重量為250克以下，如K60PRO 6K是屬於較輕量型的多旋翼機，Type1中大部分的無人機可飛行時間約為15分鐘，飛行總里程約2750m，常見用於室外小範圍飛行或定點飛行，不適用於巡檢任務。Type2重量為250克-2公斤，目前這個級別表現最佳為Yuneec Typhoon H Pro，2公斤以下的重量但搭載了六旋翼，同級別中少有此配備，固提升了穩定度，並具有前置超聲波避障感應器，是目前最新型的機種。本計畫使用法國Parrot Anafi 4K，機身設計可靈活執行飛行且鏡頭可調角度整範圍為所有機種中最廣的，適合巡檢任務。

此外，Type2也屬大眾最常使用的多旋翼機，大部分的無人機可飛行時間約為25分鐘，飛行總里程約4850m。Type3重量為2公斤-15公斤，如表現較好且較新型的機種為德國Aibotix X6，為六軸無人機，可替換多種感測器，Type3中大部分的無人機可飛行時間約為20分鐘。Type2與Type3常應用於地形測繪與巡檢飛行。Type4重量為15公斤-25公斤，為分級中最重的無人機，大部分被應用於農噴或其他特殊用途，如國產EG2 Pro植保機。

表 3-9 多旋翼機載具規格表

項目	Type1	Type2	Type3	Type4
重量	250 克	250 克-2 公斤	2 公斤-15 公斤	15 公斤-25 公斤
旋翼數量	4 槳	4 槳	4 槳 或 6 槳	4 槳 或 6 槳
最大飛行時間	15 分鐘	25 分鐘	20 分鐘	20 分鐘
總飛行距離	2750m	4850m	3800m	3800m
抗風	4 級風	6 級風	4-6 級風	4-6 級風
酬載重量	無法	200 克以下	2 公斤以下	10 公斤以下
用途	250 克	250 克-2 公斤	2 公斤-15 公斤	15 公斤-25 公斤
重量	室外小範圍 定點拍攝	地形測繪 巡檢飛行	1.地形測繪 2.巡檢飛行	農噴或特殊用途



(a)



(b)

圖 3.5 (a)Type1 多旋翼機 K60PRO (b) Type2 多旋翼機 Yuneec Typhoon H Pro



(a)



(b)

圖 3.6 (a)Type3 多旋翼機 Aibotix (b) Type4 多旋翼機 EG2 Pro

(2) 飛行里程計算

本計畫多旋翼無人機，主要應用於巡檢監測，因此飛行路徑將更為複雜，可能包含多個航線轉折、航高變化以及考量港區天候變化，因此評估電力總飛行時間，除了一般情況下乘上0.7以外，本計畫另外加入了乘上0.5的係數，用於天候條件不佳時的評估方式。里程計算方式如表 3-10所示，以Type2無人機為例，多旋翼機的起降，需要較長的時間，因此起降將會造成一定電力損耗，故需納入考量。在Type2機型配合0.7的安全係數，預估飛行總距離為4850m。依據此計算方法，如表 3-11所示，本計畫估計了不同種類之無人機，在不同安全係數下的單程最遠飛行距離，再以圖 3.7與圖 3.8視覺化呈現包含折返時，最遠飛行範圍。圖中明顯得知0.5的安全係數範圍明顯比0.7安全系要小的多，在天候狀況較不穩定時，應採取安全係數0.5做為巡檢考量。

表 3-10 多旋翼 UAV 飛行總里程範例計算

項目	數值
原廠公告飛行時間	25 分鐘
乘上 0.7 安全係數飛行時間	17.5 分鐘(1050s)
飛行航高	120m(本計畫最大航高)
飛行速度	5m/s(原廠最佳巡航速度)
起飛速度	3m/s(原廠預設速度)
降落速度	3m/s(原廠預設速度)
起飛時間	40s
降落時間	40s
總飛行時間	1050s-40s-40s=970s
飛行總距離	30m/s*970s=4850m

表 3-11 多旋翼 UAV 不同安全係數飛行總里程計算

安全係數	Type1	Type2	Type3	Type4
× 0.5	925 m	1675 m	1300 m	1300 m
× 0.7	1375 m	2425 m	1900 m	1900 m

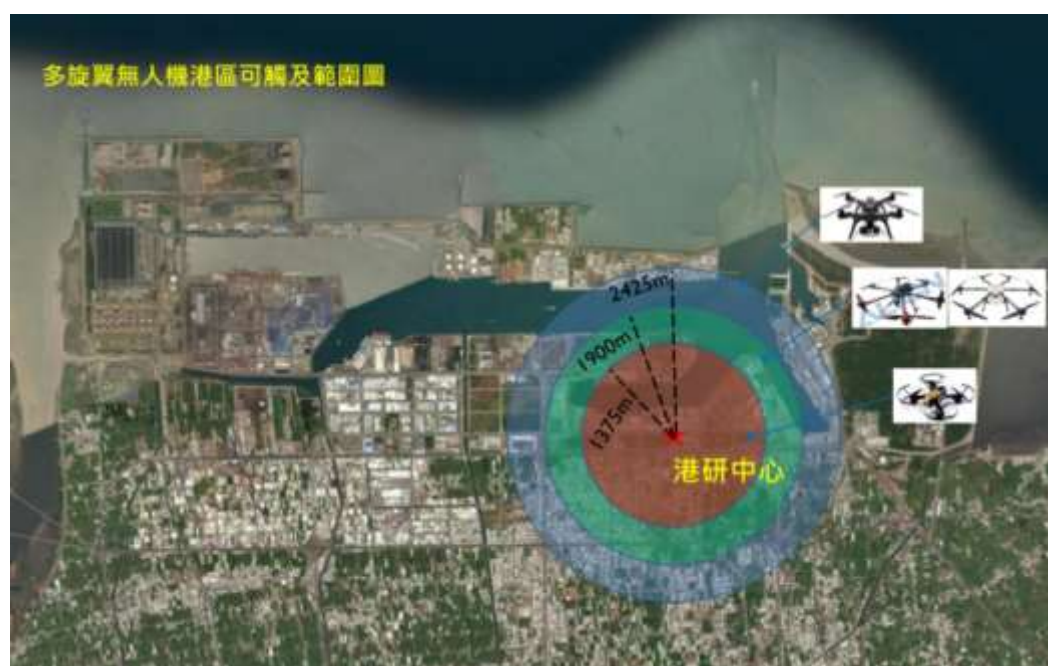


圖 3.7 多旋翼機安全係數 0.7 飛行面積範圍圖（以港研中心為中心）



圖 3.8 多旋翼機安全係數 0.5 飛行面積範圍圖（以港研中心為中心）

(3) 感測器分析

多旋翼無人機具有靈活的飛行優勢，對於不同區域地形的資料蒐集，有強大優勢，因此能酬載的感測器也包含了光學相機、熱感相機、光達。首先為光學相機，表 3-12與表 3-13列出了完整規格，在Type1與Type2的部分，酬載的感測器通常為原廠設定鏡頭模組，提供了較完整的系統整合，也有部分機種是可更換感測器。Type1主流的解析度為3840x2160，航高120m地面解析度為4.7cm/pixel，Type1被定義為娛樂用無人機，但也能提供不錯的解析度。Type2可搭載高解析度的模組鏡頭，主流的解析度為5344x4016，航高120m地面解析度為3.8cm/pixel，此種規格已能應付大部分的監測或測繪需求。Type3主流解析度為6000x4000，航高120m地面解析度為3.0cm/pixel，Type4主流解析度為7952x5304，航高120m地面解析度為3.0cm/pixel。Type3與Type4可搭載更高規格之可替換式鏡頭，甚至達電影創作等級規格，更可依照需求更換定焦或變焦鏡頭。

第二種感測器為熱感應相機，在表 3-14列出了完整規格，目前在所有機種中，較不常見配置模組化鏡頭，目前僅有Type2的機型有模組化鏡頭，通常需要另外加裝在機身上。Type2由於受限於酬載重

量，因此無法加載更優秀的鏡頭，主流解析度為320×256，航高120m地面解析度為56.3cm/pixel。Type3與Type4可掛載高階鏡頭，主流解析度為640×512，航高120m地面解析度為28.1cm/pixel。

第三種感測器為光達，由於受限於儀器酬載極限，目前僅有Type3與Type4可搭載，其規格如表 3-15所示。此外，為了配合多旋翼無人機靈活的特性，主流為搭載360°全視野的掃瞄儀，航高80m點密度為85pts/m²。此外，相比定翼機搭載的光達，多旋翼機更能在小區域定點蒐集完整且細緻化的資料。本計畫將3種感測器與不同類型無人機整合於表 3-16，依照需求選擇適用的無人機機型與感測器。

表 3-12 多旋翼 UAV Type1、2 可搭載之光學相機規格表

光學相機	Type1	Type2
		
型號	K60PRO 6K Cam	Parrot Anafi 4K Cam
種類	模組鏡頭&可替換式鏡頭	模組鏡頭&可替換式鏡頭
像素	1200 萬畫素	2100 萬畫素
解析度	3840x2160	5344 x 4016
感光元件	1/2.3 英吋 CMOS	1/2.4 英吋 CMOS
相機重量	100 克以下	200 克以下
航高 120m 地面 解析度	4.7cm/pixel	3.8cm/pixel

表 3-13 多旋翼 UAV Type3、4 可搭載之光學相機規格表

光學相機	Type3	Type4
		
型號	SONY A7R II	SONY A7RIV A7R4A
種類	模組鏡頭&可替換式鏡頭	模組鏡頭&可替換式鏡頭
像素	4240 萬畫素	6100 萬畫素
解析度	7952 x 5304	9504 x 5344
感光元件	1 英吋 CMOS	1 英吋 CMOS
相機重量	5 公斤以下	5 公斤以下
航高 120m	3.0cm/pixel	2.3cm/pixel

表 3-14 多旋翼 UAV 可搭載之熱感應相機規格表

熱感應相機	Type2	Type2	Type3,4
			
型號	FLIR VUE	Parrot anafi usa	FLIR A65
種類	可替換式鏡頭	模組鏡頭&可替換式	模組鏡頭
解析度	320x256	320x256	640x512
相機重量	500 克以下	500 克以下	1 公斤以下
航高 120m 地	56.3cm/pixel	56.3cm/pixel	28.1cm/pixel

表 3-15 多旋翼 UAV 可搭載之光達規格表

光達	Type3,4	
		
型號	YellowScan	
種類	全視野	
FoV	360°	
重量	1.7 公斤	
航高 80m 點密度	85pts/m ²	

表 3-16 多旋翼機可搭載之感測器統整表

類型	光學相機	熱感應相機	光達
用途	1.巡檢拍攝 2.一般監測	溫度檢測	小範圍三維空間資料 蒐集
Type1	可掛載; GSD: 4.7cm/pixel	無法掛載	無法掛載
Type2	可掛載 GSD: 3.8cm/pixel	可掛載 GSD:56.3cm/pixel	無法掛載
Type3	可掛載、可替換 GSD: 3.0cm/pixel	可掛載、可替換 GSD: 28.1cm/pixel	可掛載、可替換 點密度: 85pts/m ²
Type4	可掛載、可替換 GSD: 2.3cm/pixel	可掛載、可替換 GSD: 28.1cm/pixel	可掛載、可替換 點密度: 85pts/m ²

3.2 港區氣象資料

無人機能否穩定順利完成任務，最大關鍵因素為天候，若執行飛行任務時遭受到較差的天氣狀況，例如強風、降雨等，可能會造成無人機直接墜毀，或是無法有效率執行任務，因此天候評估是相當重要的一環。此外，港區位於海陸交界處，天候又更為多變，故本計畫蒐集了臺中港周邊的氣象站包含T2, T5, T6, T8之逐時風速資料與梧棲站降水資料用以評估無人機的適用性，測站位置分布如圖3.9所示。

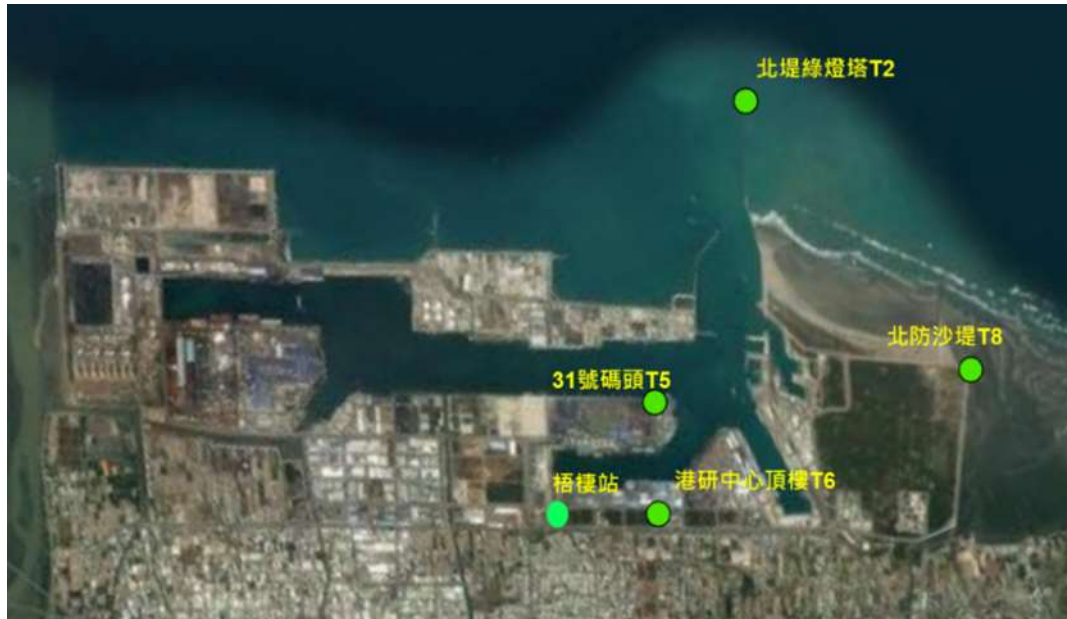


圖 3.9 臺中港氣象站分布圖

3.2.1 無人機抗風與防水條件定義

本計畫列出了多旋翼無人機與定翼無人機的最大抗風條件，如表 3-17所示，各類型無人機對應至蒲氏風力級數。此外，關於無人機防水係數，目前各無人機原廠並無明確說明，但也具有一定能力的防水功能，降水量20mm/day的小雨情況視為可飛行，另表 3-17提供了無人機對應風速建議之安全係數。

表 3-17 蒲氏風力級數與無人機最大抗風條件表

風級	名稱	平均風速 (公尺/秒)	建議安全係 數	無人機最大抗風
0	無風	0-0.2		-
1	軟風	0.3-1.5		-
2	輕風	1.6-3.3		-
3	微風	3.4-5.4	× 0.7	多旋翼無人機 Type1
4	和風	5.5-7.9	× 0.7	多旋翼無人機 Type2,3,4
5	清風	8.0-10.7	× 0.5	定翼無人機 Type1,2
6	強風	10.8-13.8	× 0.5	定翼無人機 Type2,3
7	疾風	13.9-17.1		-
8	大風	17.2-20.7		-
9	烈風	20.8-24.4		-
10	狂風	24.5-28.4		-

3.2.2 港區風速評估

為了評估各類無人機於適用於港區之飛行範圍，如圖 3.10所示劃定A, B, C, D四個區域，長約為13356m，寬約為2000m，並標示四角坐標於圖面上，再以逐時風速資料評估各區域內最適用之無人機。本計畫以趨勢內插法(Linear Trend Interpolation)(Luo et al., 2008)計算全港區所有範圍風速趨勢。計算式如式(3)。

$$W_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i \quad i = 1, 2 \dots n \quad (3)$$

其中 (x_i, y_i) 為測站位置平面坐標; a_0, a_1, a_2 為求解擬和參數; W_i 為擬合風速成果。

$$V + B\Delta = f \quad (4)$$

$$N = B^T W B \quad (5)$$

$$t = B^T W f \quad (6)$$

$$\Delta = (B^T W B)^{-1} B^T W f \quad (7)$$

式(4)為使用間接觀測觀測平差公式求解式(3)，其中V為改正數矩陣，表示針對觀測量進行改正;B為係數矩陣，在矩陣中包含了平面坐標所構成的係數; Δ 為未知參數矩陣，也就是 a_0, a_1, a_2 ;f為觀測量矩陣，將每一個位置的風速值代入。式(5)與式(6)N與t為法方程式求解;W權矩陣，在本計畫中設定為等權。式(7)為法方程式N的逆矩陣與t乘積，透過該式即可求出參擬合參數 a_0, a_1, a_2 之 Δ 矩陣。最後需將擬合參數代回式(3)，只需要輸入分區範圍內任意平面坐標至式即可內插出風速值。如圖 3.11與圖 3.12所示，最後再透過式(3)內插成網格資料，將每區的逐時風速的網格資料取平均值，並把逐時風速資料標準化單位為日，依據各區每月逐日風速趨勢變化，再透過表 3-17的無人機抗風條件，即可得知一個月內共有幾天符合抗風條件，再除以一個月的天數(標準化)，即可獲得無人機可飛行天數百分比。不同區之各類型無人機可飛行天數百分比如圖 3.13至圖 3.14呈現，

不同顏色表示不同級風，紫色表示風速小於3級風，藍色表示風速介於3到4級風之間，綠色表示風速介於4到5級風之間，最後紅色為風速大於5級風，表 3-18至表 3-21為數值成果，藍色為大於60%之可飛行天數百分比。



圖 3.10 臺中港區分區範圍圖

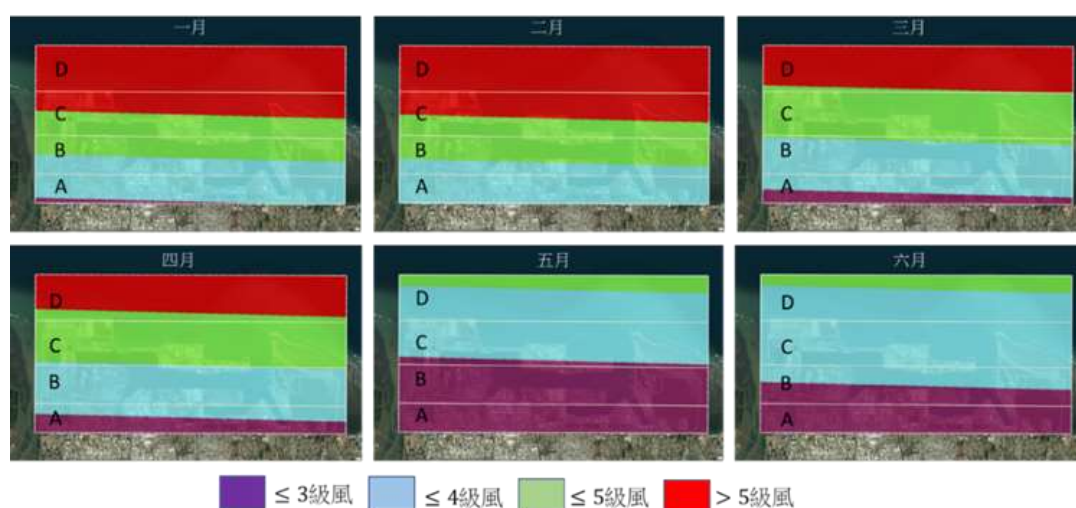


圖 3.11 臺中港區一月至六月平均風勢趨勢圖

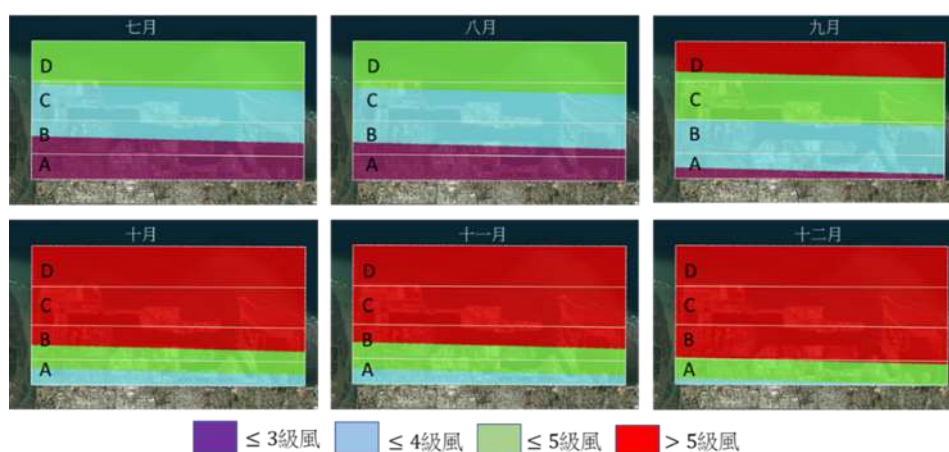


圖 3.12 臺中港區七月至十二月平均風勢趨勢圖

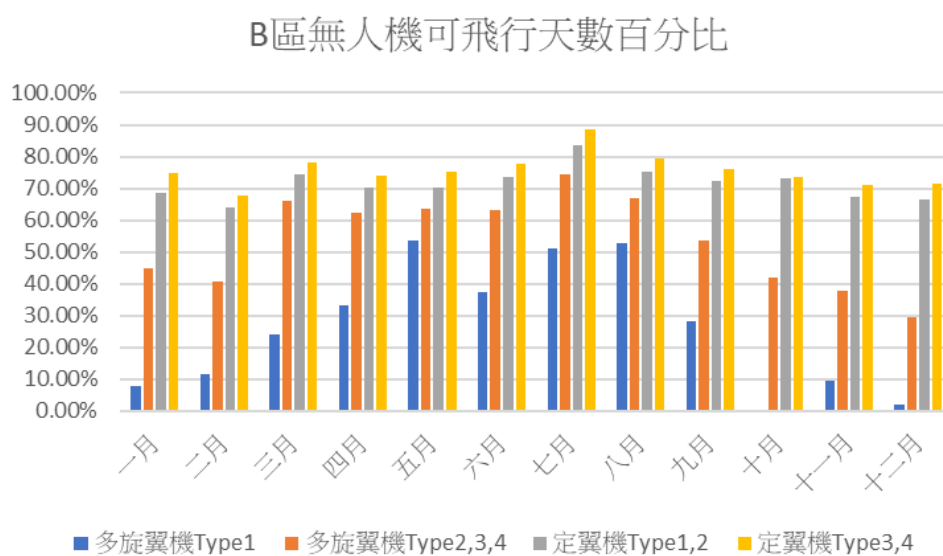
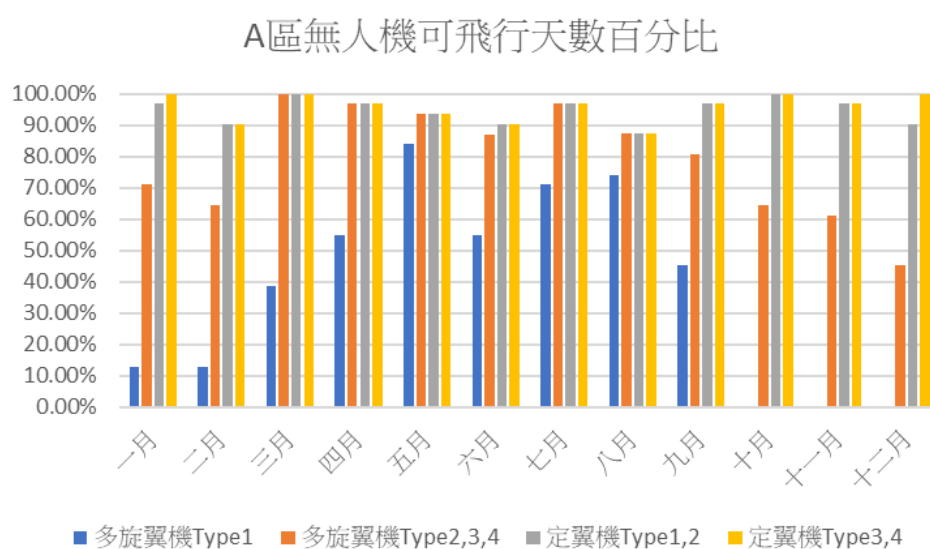


圖 3.13 臺中港 A 區與 B 區可飛行天數百分比圖

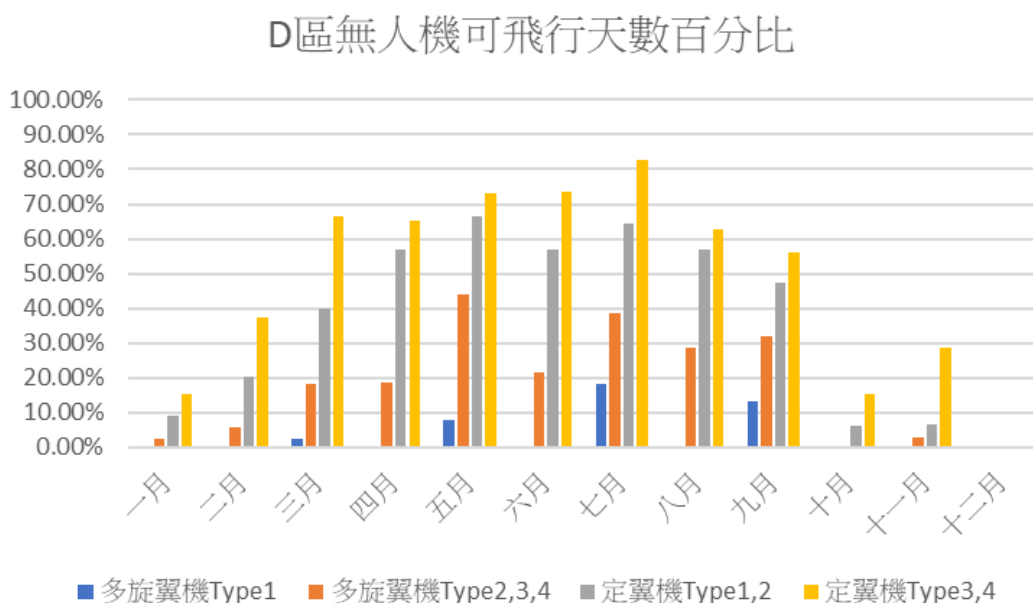
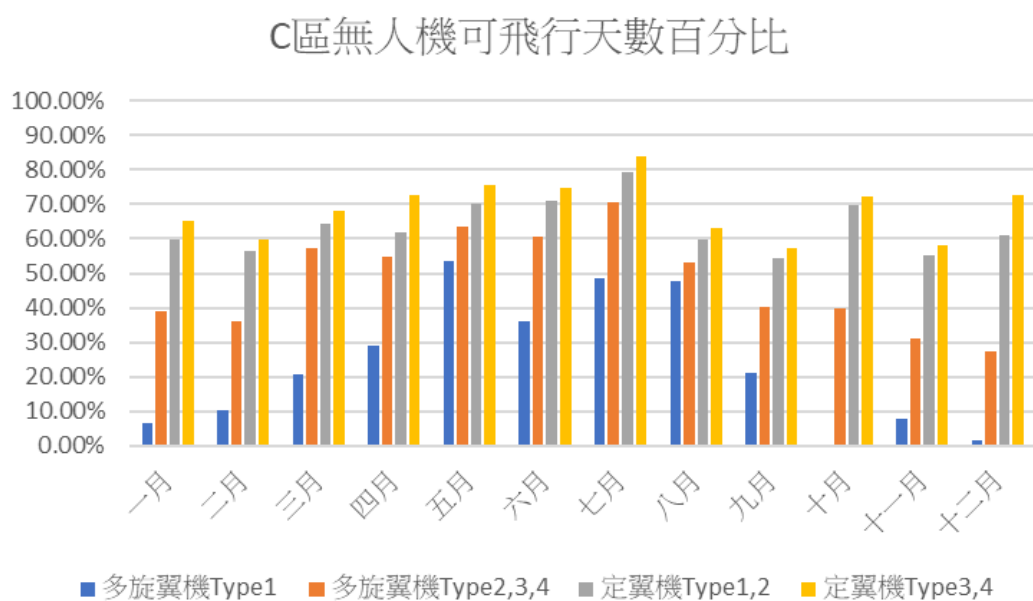


圖 3.14 臺中港 C 區與 D 區可飛行天數百分比圖

表 3-18 臺中港 A 區可飛行天數百分比表

無人機類型	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
多旋翼機 Type1	12.9%	13.0%	38.7%	54.8%	83.9%	54.8%	71.0%	74.2%	45.2%	0.0%	0.0%	0.0%
多旋翼機 Type2,3,4	71.0%	64.5%	100.0%	96.8%	93.5%	87.1%	96.8%	87.4%	80.6%	64.5%	61.3%	45.2%
定翼機 Type1,2	96.8%	90.3%	100.0%	96.8%	93.5%	90.3%	96.8%	87.4%	96.8%	100.0%	96.8%	90.3%
定翼機 Type3,4	100.0%	90.3%	100.0%	96.8%	93.5%	90.3%	96.8%	87.4%	96.8%	100.0%	96.8%	100.0%

表 3-19 臺中港 B 區可飛行天數百分比表

無人機類型	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
多旋翼機 Type1	7.6%	11.5%	23.9%	33.1%	53.5%	37.2%	51.2%	52.9%	28.1%	0.0%	9.3%	1.8%
多旋翼機 Type2,3,4	44.7%	40.6%	65.9%	62.4%	63.4%	63.0%	74.4%	66.8%	53.4%	42.0%	37.8%	29.6%
定翼機 Type1,2	68.6%	64.0%	74.2%	70.2%	70.1%	73.5%	83.7%	75.2%	72.2%	73.3%	67.1%	66.4%
定翼機 Type3,4	74.8%	67.6%	78.3%	74.1%	75.3%	77.5%	88.4%	79.3%	76.2%	73.5%	70.9%	71.5%

表 3-20 臺中港 C 區可飛行天數百分比表

無人機類型	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
多旋翼機 Type1	6.7%	10.1%	20.8%	29.1%	53.3%	35.9%	48.6%	47.7%	21.2%	0.0%	7.6%	1.3%
多旋翼機 Type2,3,4	39.1%	35.9%	57.3%	54.9%	63.6%	60.8%	70.6%	53.1%	40.2%	39.9%	31.0%	27.2%
定翼機 Type1,2	59.9%	56.5%	64.4%	61.7%	70.2%	70.9%	79.5%	59.8%	54.4%	69.6%	55.1%	61.1%
定翼機 Type3,4	65.4%	59.7%	68.0%	72.9%	75.5%	74.8%	83.9%	63.1%	57.4%	72.3%	58.1%	72.7%

表 3-21 臺中港 D 區可飛行天數百分比表

無人機類型	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
多旋翼機 Type1	0.0%	0.0%	2.6%	0.0%	7.8%	0.0%	18.1%	0.0%	13.4%	0.0%	0.0%	0.0%
多旋翼機 Type2,3,4	2.6%	5.7%	18.1%	18.6%	43.8%	21.4%	38.7%	28.4%	32.0%	0.0%	2.6%	0.0%
定翼機 Type1,2	9.2%	20.3%	39.8%	57.0%	66.5%	57.0%	64.3%	57.0%	47.5%	6.2%	6.4%	0.0%
定翼機 Type3,4	15.3%	37.3%	66.5%	65.2%	73.2%	73.6%	82.7%	62.7%	56.1%	15.3%	28.5%	0.0%

3.3 無人機適宜性評估

根據氣象資料評估，A區最適合多旋翼無人機Type1，四月、七月、八月平均風速約為4m/s以下，對應至逐日資料，超過60%可飛行天數，為所有區域中最高。B區最適合多旋翼無人機Type2、3、4，三至八月平均風速約為4m/s~6m/s以下，對應至逐日資料，超過60%可飛行天數。C區最適合定翼無人機Type1、2，三至七月與十月、十二月，超過60%可飛行天數。D區最適合定翼無人機Type3、4，三至八月，超過60%可飛行天數。此外，D區之無人機同時也可飛行於A、B、C區，C區之無人機可飛行A、B區，除了A區之無人機以外，其餘以此類推。感測器部分，成果依照表 3-9與表 3-16所示，多旋翼機Type1僅能掛載光學相機，以及多旋翼機Type2僅能掛載光學與熱像外，其餘機種皆能掛載各類感測器。本計畫將各區所適用的無人機飛行區域以及可掛載感測器以圖 3.15呈現。



圖 3.15 各區適宜無人機與可掛載感測器分布圖

3.4 本計畫巡檢無人機設備成本估算

以本計畫Type2多旋翼無人機為例，詳細估算如圖 3.16。無人機與電池5年需汰換掉。5年2台無人機總價約為100,000-200,000元，再換算為每1年所耗費的無人機總價約為20,000-40,000元。電池設備5年總價約為40,000-80,000元，再換算為每1年的電池費用總價約為8,000-16,000元。無人機保險費用費2年兩台總價約為30,000-40,000元，再換算為每1年費用總價約為15,000-20,000元。民航局無人機的申請許可為每1年為2,000元，並不限制無人機數量。無人機法人註冊2年兩台總價為100元，換算為1年總價為50元。如表 3-22所示，最後單位化為1年的總價為45,050-78,050元。

項目	單價	數量	總價	更新頻率
多旋翼無人機	50,000-100,000	2台	100,000-200,000	每5年
電池	5,000-10,000	8顆	40,000-80,000	每5年
保險	15,000-20,000	2台	30,000-40,000	每1年
民航局飛行申請許可	500	4次/年	2,000	每3個月
無人機法人註冊	50	2台	100	每2年

圖 3.16 Type2 多旋翼無人機硬體購置與維護成本估算清單

表 3-22 Type2 多旋翼無人機設備五年使用維護攤提費用攤提計算價表

項目	換算 1 年總費用
多旋翼無人機	20,000-40,000 元
電池	8,000-16,000 元
保險	15,000-20,000 元
民航局飛行申請許可	2,000 元
無人機法人註冊	50 元
1 年總價	45,050-78,050 元

3.5 本章小結

針對港區無人機作業，本計畫蒐集了不同種類的無人機，同時也明確定義各種無人機的特性以及飛行性能，再依據無人機的酬載能力選擇可掛載之感測器。此外，巡檢過程中最為重要的影響因素

為天候，在天候佳的情況下對於無人機作業過程能更有效率執行，故本計畫再依據過去天候條件，經由數據分析明確劃分各個區域最適合使用之無人機以及可飛行之月份。透過本計畫分析，能針對不同種類之任務有最佳選擇之依據。

第四章 載具控制與取像邏輯方法

4.1 飛行模式建構方法

藉由以UAV對於港區地形資料的預先蒐集與繪製，得到相對應之三維空間資訊製作數值地表模型(DSM，Digital Surface Model)，做為無人載具飛行時之地圖資訊使用。本計畫將會提供三種飛行模式：(1)地形測繪模式；(2)多點巡航模式；(3)單點環飛模式，做為無人載具執行任務時的功能選擇，完成功能模式之選擇，需設定取像方法之相關參數，包括待測目標物、相對飛行高度、影像參數，經由A-star路徑規劃演算法自動規劃各飛行點位，以完成整體飛行任務。飛行模式主要是以多旋翼機進行開發，多旋翼機能穩定停懸，以及高機動性之特點，在巡檢取像時較有優勢。無人載具之飛行與取向邏輯之整體流程如下圖 4.1所示，並將會在下列各小節詳細說明。

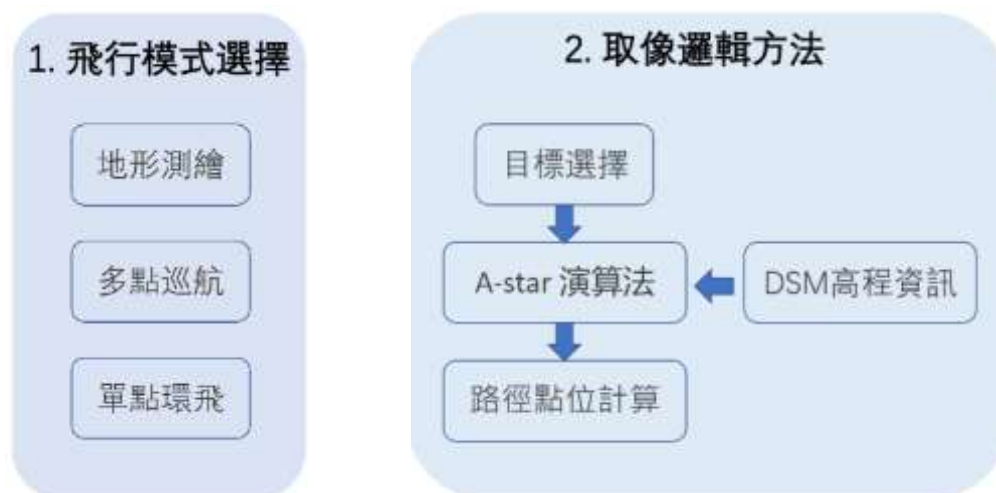


圖 4.1 無人載具之飛行與取像邏輯之整體流程

4.1.1 無人機地形測繪

地形測繪方法係為對指定區域進行範圍式區域檢視，可用於對地形物件之詳細檢驗抑或是連續性蒐集區域資料。在此方法中，需設置待測區域之範圍，並決定載具在任務中的相對飛行航高，相對航高將會決定在連續飛行中每個時刻下的離地高度，且需設定飛行之最大航高與飛行時之基本影像參數，完成上述參數設定後，將會

由A-star演算法計算在目標區域中各飛行點位如下示意圖 4.2，並估算任務之飛行時間，與預計拍攝之影像張數，完成飛行任務規劃。

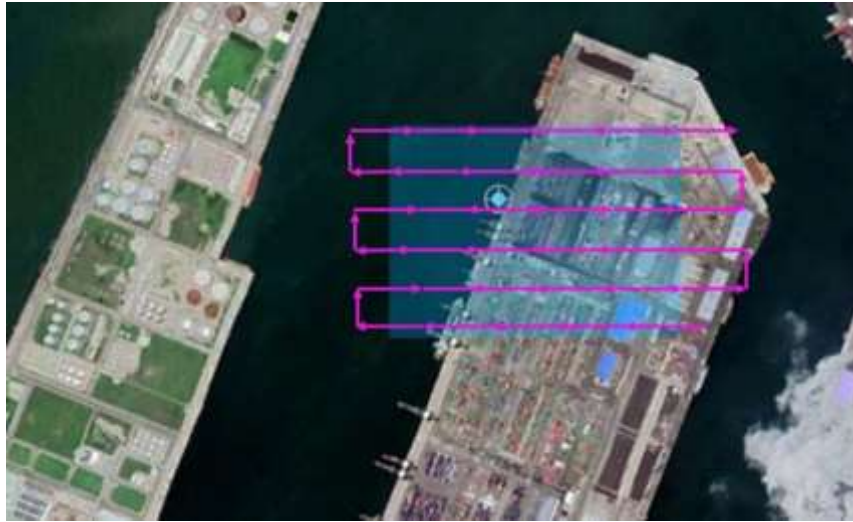


圖 4.2 無人機地形測繪示意圖

4.1.2 無人機多點巡航

多點巡航方法係為連續對於多目標點位進行檢視與拍攝，可用於快速勘查特定區域或用於規律性之巡航作業。多點巡航下，需設置多個目標點位、相對飛行高度、飛行航高限制，與拍攝影像之相關基本參數，載具之飛行順序將依與起始飛行點位之距離進行排序，由A-star演算法計算點與點之間的預計飛行路徑，與估計飛行時間以及預計拍攝之影像張數，再依照點位順序進行飛行作業，並在任務完成後自動飛回起始點位(圖 4.3)。



圖 4.3 無人機多點巡航示意圖

4.1.3 無人機單點環飛

單點環飛方法係為對地圖上單一物件或點位進行自動化環繞式飛行任務，在飛行中系統邏輯將會判斷物件之位置調整拍攝角度與方向，對相同特定物件進行連續性的拍攝，可執行針對特定事件之物體監測使用，能蒐集更細部且完整的資訊，以滿足的作業需求(圖 4.4)。此種模式下，需設置此物件之涵蓋範圍做為環飛範圍之判斷依據，以及相對飛行高度、飛行航高限制，與影像之相關基本參數，將所需條件設定完成後將由A-star演算法依目標物涵蓋範圍邊界計算環繞式飛行之各點飛行路徑，與估計飛行時間以及預計拍攝之影像張數，並在任務完成後自動飛回起始點位。

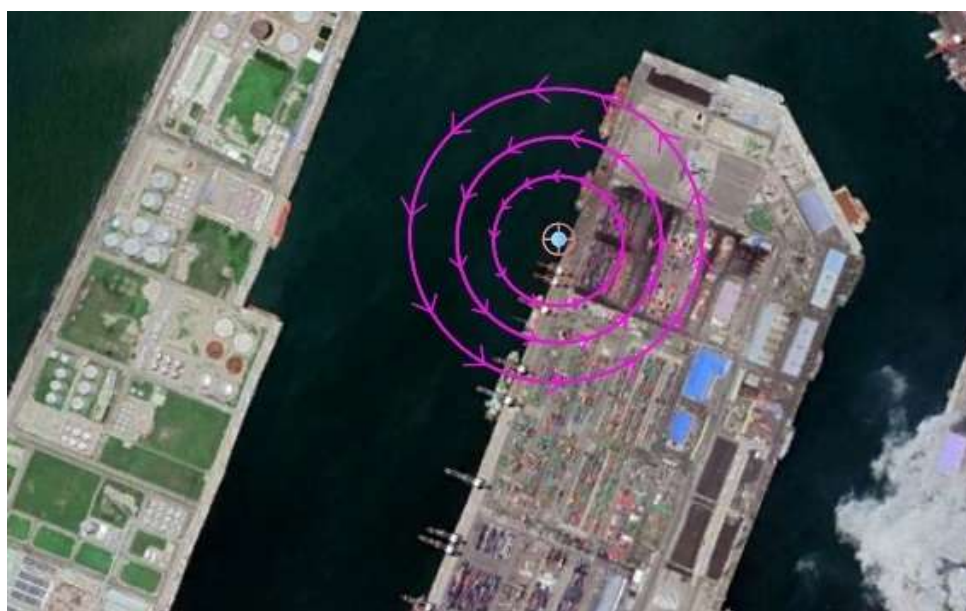


圖 4.4 無人機單點環飛示意圖

4.2 無人機取像邏輯方法

4.2.1 影像參數

在選擇適當飛行模式時，主要會需要輸入目標物、相對飛行高度、飛行高度限制，與影像相關參數，輸入的細節將會依照不同模式有些微差異。而影像相關參數包含影像畫素、影像大小、地面採樣距離(GSD)與重疊率，影像畫素與影像大小將會由不同載重等級之飛行無人載具上，所掛載的相機設備所決定，為一固定數值，以

Parrot Anafi為例：影像畫素為1600萬畫素，影像大小為4600 x 3400。地面取樣距離係為說明拍攝影像像素與實際拍攝範圍大小之比例關係參數，計算方式如式(8)所示，實際拍攝範圍大小將會取決無人載具之飛行高度。重疊率為兩張影像間重疊部分之比例關係(圖 4.5)，而無人飛行載具在任務中為連續性飛行拍攝，故將會以飛行速率(米/秒)、GSD(m/pixel)與總飛行距離決定影像重疊率與影像取樣週期(秒/張)，計算方法將會如式(10)。

$$GSD = \frac{\text{相對航高}(H)}{\text{焦距}(f)} = \frac{\text{實際距離}}{\text{像素}} \left(\frac{m}{pixel} \right) \quad (8)$$

$$\text{取像週期(秒/張)} = \frac{\text{總飛行距離}(m) / \text{飛行速率}(m/s)}{\left(\frac{\text{總飛行距離}(m)}{\text{相片大小}(m) * \text{重疊率}} \right) + 1} \quad (9)$$

$$\text{重疊率} = \frac{\text{相片中心距離}(m)}{\text{相片大小}(m) * \text{重疊率}} * 100\% \quad (10)$$

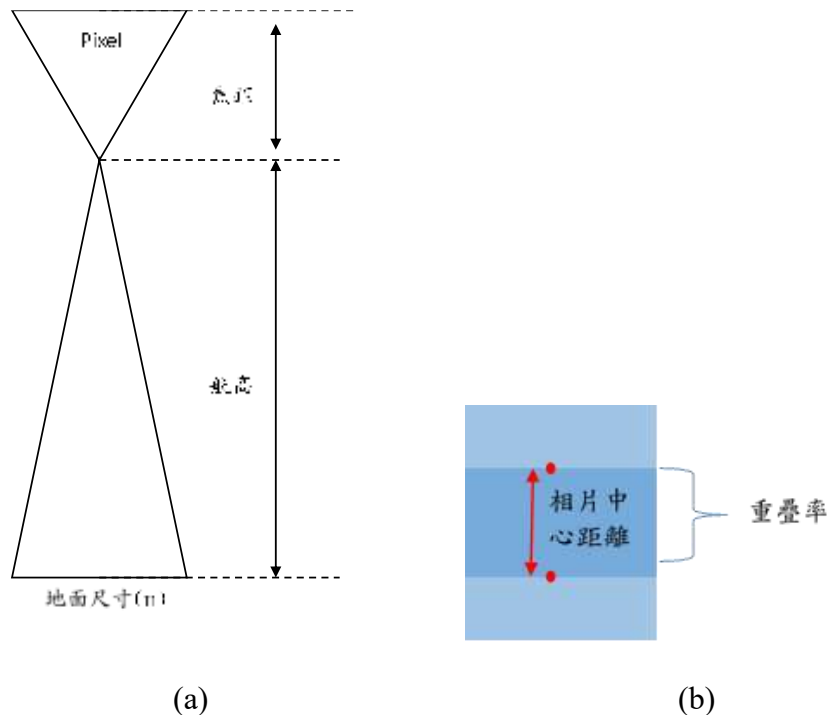


圖 4.5 無人機取像邏輯分析(a)GSD 圖示 (b)重疊率圖示

4.2.2 A star 演算法

藉由預先建構或模擬之底圖，可知在施測範圍的空間資訊，並再選取目標物與目標範圍後，應用A*(A-star)搜尋演算法進行無人機路徑規劃。A*演算法係基於最佳優先演算法(Pearl, 1984)與戴克斯特拉演算法(Dijkstra, 1959)，綜合兩者之優點改進而來，最佳優先演算法結合深度優先演算法與廣度優先演算法的概念，不以增加單一維度搜尋為主要考量，建構合理的優先排序規則，搜尋節點的同時考量廣度與深度，但通常節點的好壞評估難以界定，故在具先驗資訊的情況下，如已建構之地圖資訊，使用此種演算法將會有較好的成果。戴克斯特拉演算法是以起始點位開始，朝向八方位擴展(如圖4.6)，計算與相鄰點位的距離成本，直至搜尋到目標點位才停止計算，之後再考慮起始點至目標點的最短路徑，但此種演算法將會耗費較多時間。而A*演算法綜合兩者是概念與特性，同樣將會從起始點開始計算在鄰近點的距離成本，並需要目標點之位置先驗資訊，故得以朝向正確的方位找尋最短路徑，且在計算距離成本的同時將會記錄目前的在相同距離節點的相對最小距離成本值和最小距離成本點位，以此作為優先排序規則，降低點位搜尋的計算量，在找到目標點時，路徑也規劃完成，相較於前述兩種演算法，A*在每一次搜尋都動態排序搜尋成果，不斷更新，因此能不斷修正搜尋方向以減少搜尋的次數，而此演算法的缺點係為需要具可靠度之先驗資訊且不會有詳細的全域搜尋結果，但也因此得以加快搜尋速度，在本計畫中將使用此A*搜尋演算法進行飛行路徑之點位內插計算與設置，簡易公式如下：

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (11)$$

其中， $f(n)$ 表示目前節點評價分數， $h(n)$ 代表預測目前節點到結束點的距離，而 $g(n)$ 則是從起始點到目前節點距離。

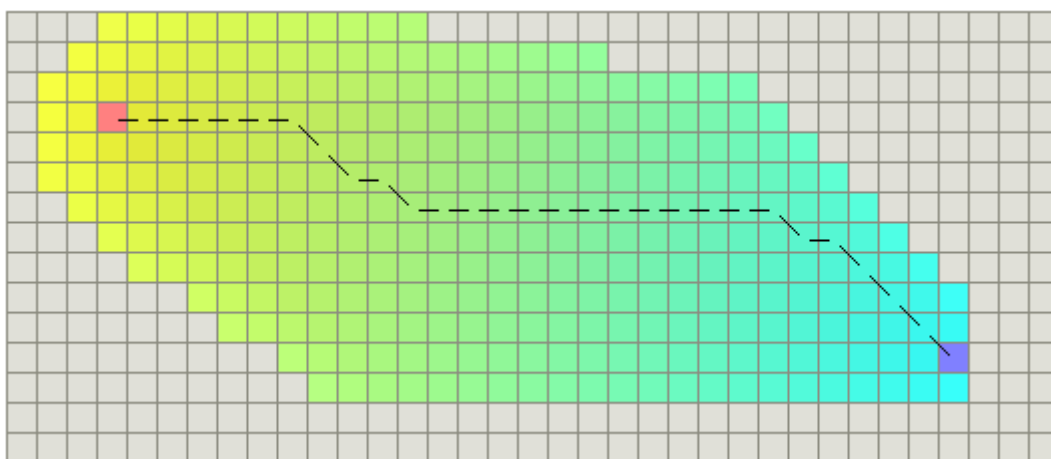


圖 4.6 A-star 演算法搜尋過程

4.2.3 飛航障礙物迴避

在本計畫為使用無人飛行載具進行相關影像蒐集作業，在航線規劃中需考量三維空間資訊，對於避障之功能更是如此，而本計畫將會分成兩步驟，對不同維度以(1)調整高度、(2)調整緩衝區，兩方法進行後續分析。

(1)調整高度

在有數值表面模型(DSM)的狀況下，已知研究區域的高程資訊，而無人飛行載具是以計算相對航高的方式飛行，相對航高為該載具垂直於地面或建物之相對高度，故假使在未達航高限制的情況下，載具將以距離相對於地面或建物之固定高度飛行；當達航高限制時將會視為障礙物，交由(2)調整緩衝區進行處理，此方式可有效處理在高程維度上所遇到的障礙物。

(2)調整緩衝區(Buffer)

本次所使用之路經規劃演算法：A-star，其演算法邏輯會偵測障礙物之位置，再加以找出適合的路線(如圖 4.7)，做為最後規劃之飛行路徑。無人載具之定位是由連線的GPS所決定，在定位精度上會有將近五公尺之誤差範圍，因此本計畫加以改進此演算法，使其能夠調整與障礙物之間的距離，稱之為緩衝區(buffer)，使規劃之路徑不會完全貼著障礙物邊界飛行，以避免因載具定位誤差造成與障礙物之碰撞，圖 4.8為將緩衝區設為5公尺下測試範例，圖 4.9為將緩衝

區設置為10公尺的結果，可以看出改良後之演算法不僅能夠避開障礙物，更能與債務邊界保持一定的距離，降低無人載具與建物擦撞損毀情況的發生。

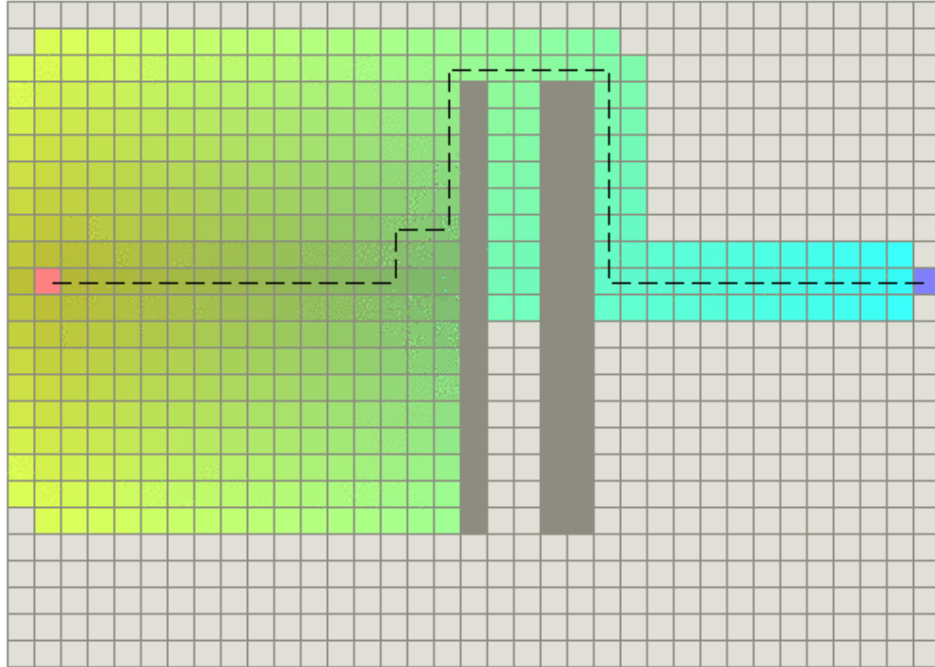


圖 4.7 A-star 演算法繞行障礙物

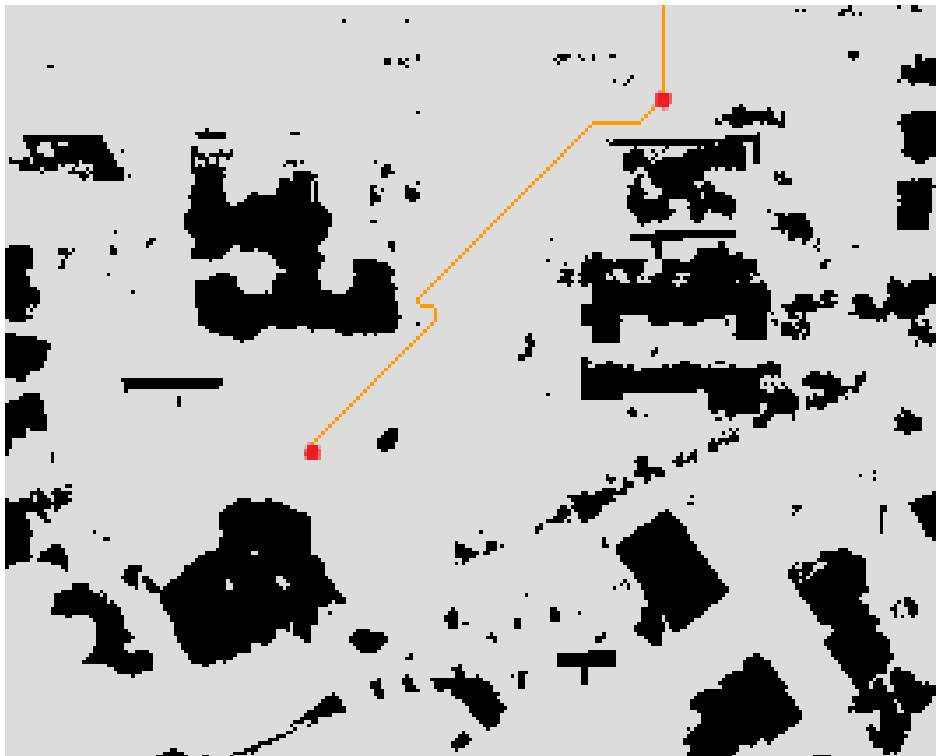


圖 4.8 無人機飛航避障路徑圖（緩衝區設定為 5 公尺）

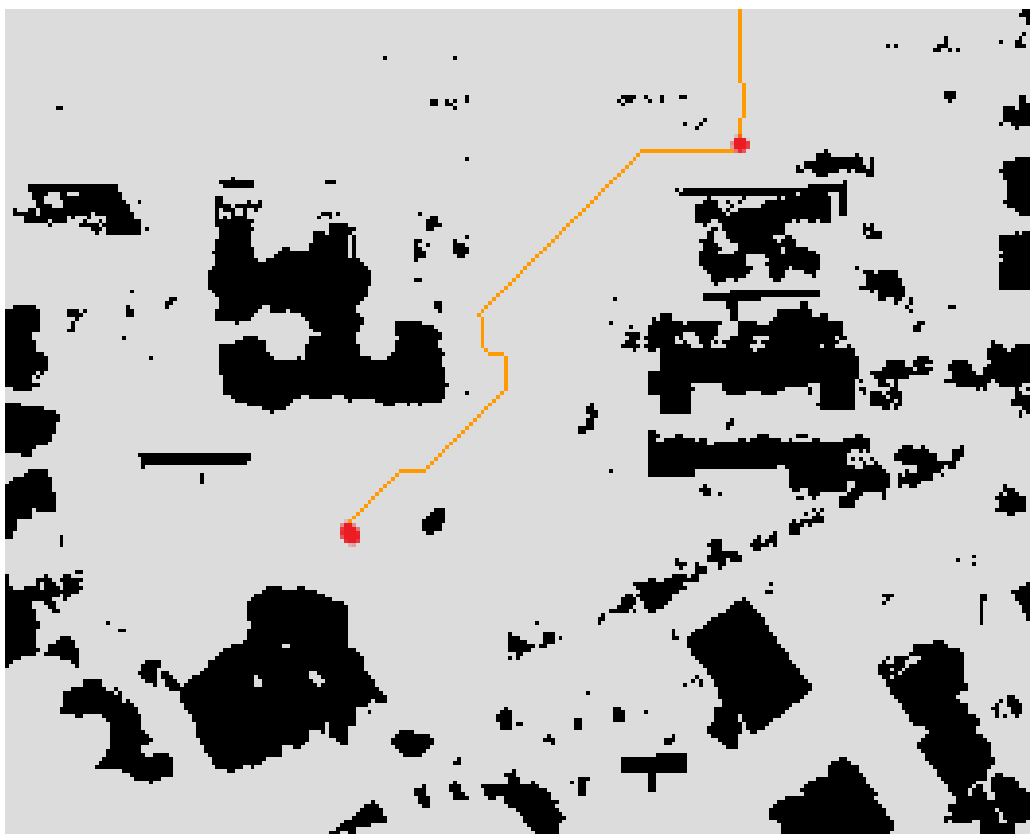


圖 4.9 無人機飛航避障路徑圖（緩衝區設定為 10 公尺）

4.2.4 控制與取像參數設定

在不同飛行模式下所需輸入之參數將如下表 4-1。

- (1) 空間參數：目標、相對航高與緩衝區大小為使用者必須設定之參數。
- (2) 載具參數：取像週期與飛行速率，此項參數系統具有預設值，使用者仍可選擇性輸入。
- (3) 影像參數：地面採樣距離(GSD)與重疊率，為系統藉由其他參數計算而得，無法由使用者端進行設定。

在參數顯示部分，所顯示之項目如表 26 共 8 項參數：

- 飛行航高(m)：無人機飛行高度
- 緩衝區大小(m)：與障礙物之間的距離
- 相機旋轉角度：拍攝角度調整
- 安全係數：針對不同任務調整所需安全係數
- 取像週期(秒/張)：設定拍攝頻率與快慢

- 飛行速率(m/s)：無人機速率
- 地面採樣距離GSD(m/ pixel)：判斷影像解析度
- 重疊率(%)：前後拍攝照片重疊比例
- 總飛行時間(min)
- 總飛行距離(m)

表 4-1 無人機控制與取像參數設定對應表

飛行模式 參數設定	地形測繪	多點巡航	單點環飛
空間參數 (使用者輸入)	目標範圍	多目標點	點位與半徑
	相對航高		
	緩衝區大小(buffer)		
載具參數 (系統預設或使用者輸入)	取像週期		
	飛行速率		
影像參數 (系統計算)	GSD		
	重疊率(僅地形測繪)		

4.3 路徑自動規劃

4.3.1 平台規劃流程

透過初始參數輸入，針對使用者設定點位與點位之間直線距離作飛行高度與數值地形模型(Digital Surface Model, DSM)高度對照分析，來判斷是否直線飛行是否會有碰撞問題。當碰撞問題存在時，將在預估碰撞位置前後點位導入A-star的路徑規劃演算，藉此來避開障礙物之外，同時加速A-star規劃效率。

從平台規劃中，飛行時間在安全範圍且點位能避免碰撞情形下，產出無人機飛行路徑點位。其點位以TWD97坐標系統框架為基準，並在WGS84坐標輸出自動化飛行軌跡條件，以飛行軌跡與使用者輸入參數轉譯為無人機自動判讀飛行檔案(Mavlink檔)，Mavlink為一種傳輸訊息至無人載具上所用的輕量級共同傳輸協議。為目前較為通用的無人機溝通傳輸格式。因此整體流程以及Mavlink檔示意圖如圖 4.10及圖 4.11：

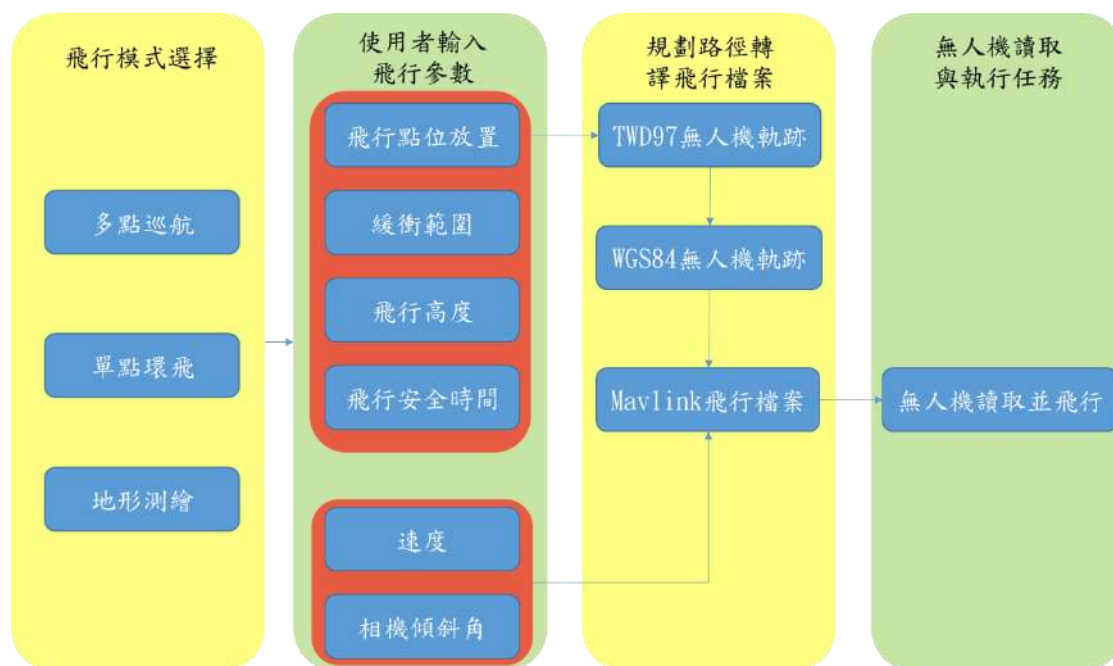


圖 4.10 無人機巡航參數設定與飛行規劃路徑檔案架構圖

任務流程碼	特殊ID	坐標系統	任務代碼	描述任務7參數										是否自動執行
0	0	3	178	1	3	0	0	0	0	0	1			1
1	0	3	16	0	0	0	0	24.21897668	120.473297	30				1
2	0	3	206	1	0	1	0	0	0	1				1
3	0	3	16	0	0	0	0	24.22495811	120.4797706	30				1
4	0	3	16	0	0	0	0	24.22522959	120.4799467	30				1
5	0	3	16	0	0	0	0	24.22550046	120.4799456	30				1
6	0	3	16	0	0	0	0	24.22577132	120.4799445	30				1
7	0	3	16	0	0	0	0	24.22604219	120.4799434	30				1
8	0	3	16	0	0	0	0	24.22631306	120.4799423	30				1
9	0	3	16	0	0	0	0	24.22658393	120.4799412	30				1
10	0	3	16	0	0	0	0	24.2268548	120.4799401	30				1
11	0	3	16	0	0	0	0	24.22712566	120.479939	30				1

圖 4.11 飛行規劃路徑輸出 Mavlink 檔案格式內容

4.3.2 Mavlink 檔案格式內容參數介紹

Mavlink檔案中每項任務均由七項參數做任務控制，透過無人機執行目的而有個別所屬任務代碼。而每項任務可以描述如飛行前往位置、相機角度調整、飛行速度調整、拍攝頻率等。本年度共使用以下共四種任務代碼做為本平台所輸出的飛行檔案使用：

(1) 任務代碼178：

主要設定飛機飛行速度，而本代碼7參數各代表意義如下：

ID	1	2	3	4	5	6	7
178 速度設定	Speed type	speed	Throttle	0	0	0	0

- Speed Type：速度模式，均使用1，設定為地面速度。
- Speed：速度，數值為使用者在平台上所輸入的數值，單位為m/s。
- Throttle：風機，調整使用比率，通常設為0%。

(2) 任務代碼16：

主要設定飛機下一個抵達位置，而本代碼7參數各代表意義如下：

ID	1	2	3	4	5	6	7
16 路徑點	Hold time	Accept Radius	Pass Radius	Yaw	緯度	經度	高度

- Hold time：留在點位上時間，通常設定為0秒。
- Accept Radius：抵達目標處多少範圍內為成功抵達，通常設定為0m。
- Pass Radius：設定通過方式，通常設定為0來忽略此設定。
- Yaw：設定抵達時飛機的旋轉角度，通常設定為0度。
- 緯度、經度、高度：分別設置前面規劃後所獲得WGS84經緯度與設地的飛行高度。

(3) 任務代碼206：

主要設定飛機所掛載相機拍攝頻率，而本代碼7參數各代表意義如下：

ID	1	2	3	4	5	6	7
206 拍攝頻率	Distance	Shutter	Trigger	0	0	0	0

- Distance：飛行多少距離後相機進行拍攝，單位為m。
- Shutter：相機快門時間，單位為ms。
- Trigger：是否啟動拍攝。

(4) 任務代碼1000：

主要設定飛機所掛載雲台旋轉角度，而本代碼7參數各代表意義如下：

ID	1	2	3	4	5	6	7
1000 雲台角度控制	Pitch angle	Yaw angle	Pitch rate	Yaw rate	Gimbal manager flags	0	Gimbal device ID

- Pitch angle：Pitch角度設定，正值為往上，範圍落在-180~180度。
- Yaw angle：Yaw角度設定，正值為往右，範圍落在-180~180度。
- Pitch rate、Yaw rate：旋轉速度變化設定，單位為 $^{\circ}/s$ 。
- Gimbal manager flags：特殊條件設定，通常為0。
- Gimbal device ID：指定雲台ID，本次研究只使用單一雲台，故設定為0即可。

4.3.3 模擬飛行結果分析

進入實體飛機進行飛行前，為了確認飛行檔案的正確性，先將飛行檔案匯入電腦軟體Software in the loop(SITL)仿真環境中做測試，SITL飛行模擬器為用於模擬任何無人載具任務控制之模擬軟體，不僅可以模擬飛機執行飛行任務，也能監測飛行任務所耗費的理想時間與電量評估，可用來驗證飛行任務之可行性。驗證飛行檔案中的任務是否正確且路徑是否符合，測試畫面如圖 4.12所示：

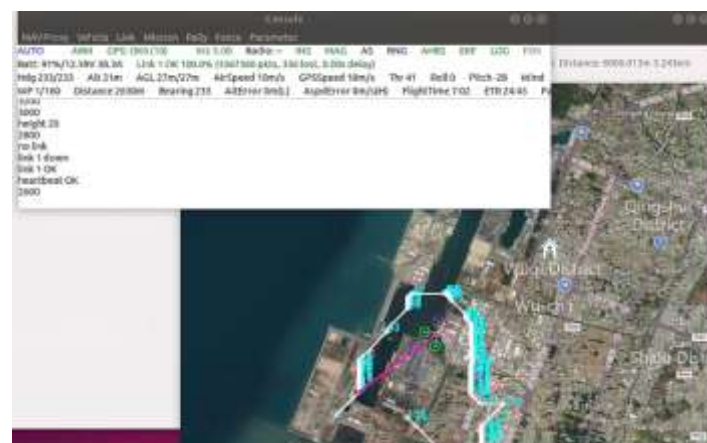


圖 4.12 SITL 成功讀取飛行檔案且正確執行示意圖

4.3.4 飛機硬體配置

基於港區環境變化與風速場較為嚴峻的環境，以及讓平台規劃的飛行檔案能夠被無人機飛控軟體做識別與判斷飛行任務。如圖 4.13 所示，本期計畫採購自組設備並組裝測試用無人機設備。其詳細規格如表 4-2 所示。機架上採用六軸機架，強化無人機在強風情況下拍攝的穩定性，並減少無人機執行任務下墜落之可能性；搭載圖傳發射及接收模組，可以長距離無線傳輸無人機拍攝畫面，此模組未來能夠轉配置在電腦上，並上傳至雲端來增強傳輸距離；為了避開無人機執行任務期間遇到突發性障礙物碰撞，也加設無人機前、後、左、右以及上方雷射避障功能，透過飛控控制無人機在安全距離內進行即時避障。目前無人機正在組裝並做最後整體設備調整，表 4-3 針對此無人機目前評估飛行效率。



圖 4.13 引入之巡檢用無人機圖

表 4-2 引入之巡檢用無人機規格表

機架	六軸機架(軸距約 920mm)
飛控系統	V5 NANO 開源飛控 (含 GPS)
遙控器	AT9S PRO
影像傳輸系統	圖傳發射及接收模組(5.8G)，配備 1 台 7 吋圖傳接收螢幕
數傳系統	使用 915MHz100mw 數傳模組
雲台系統	下置式雲台(相機穩定器)
重量	3~5 公斤
避障系統	使用雷射避障，前後左右及上方共 5 向避障

表 4-3 預估機體飛行任務效率

平均飛行時間	10~20 分鐘(會依據飛行環境變動)
最佳飛行速度	5 m/s
軌跡紀錄	可以在飛行任務完成後下載

4.3.5 路徑規劃飛行成果

在進行港區實地驗證前，為了安全上的考量以及參數調整測試，本計畫先在校園較為單純之環境進行初步測試，確認無人機之影像傳輸功能、訊號傳輸功能、飛控邏輯、電持續行力以及飛行穩定性等各項功能皆為穩定。測試情境為本計畫提出之三個飛行模式，單點環飛、多點巡航以及地形測繪模式。路徑規劃流程如圖 4.14所示，共分成四大步驟，1.規劃無人機之航線2.航線自動規劃解算 3.將規劃航線傳入至無人機 4.無人機自動飛行。其中在第三步驟需透過開放之航線規劃軟體Mission Planner與無人機進行溝通，須確定該步驟無任何問題後，才能執行實際飛行規劃。

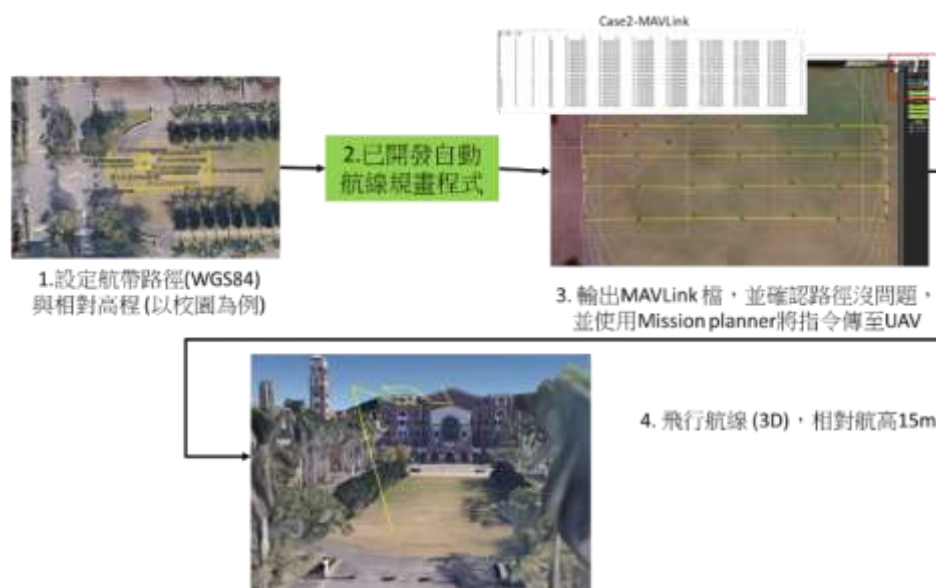


圖 4.14 規劃航線與無人機溝通流程圖

測試成果如圖 4.15至圖 4.17所示，包含呈現所使用之Mavlink檔。此外，三者的預設航線在圖 4.15至圖 4.17中所示為黃色航線，紫色航線則為實際飛過的路徑，在這幾張圖中，可以得知實際飛行的航線確實有依據所設定之航線執行任務，些微的行線偏移可以被判定

為系統誤差，在這樣的小規模測試確定無人機能執行本計畫所開發之航線規劃程式，並能穩定與無人機進行溝通。

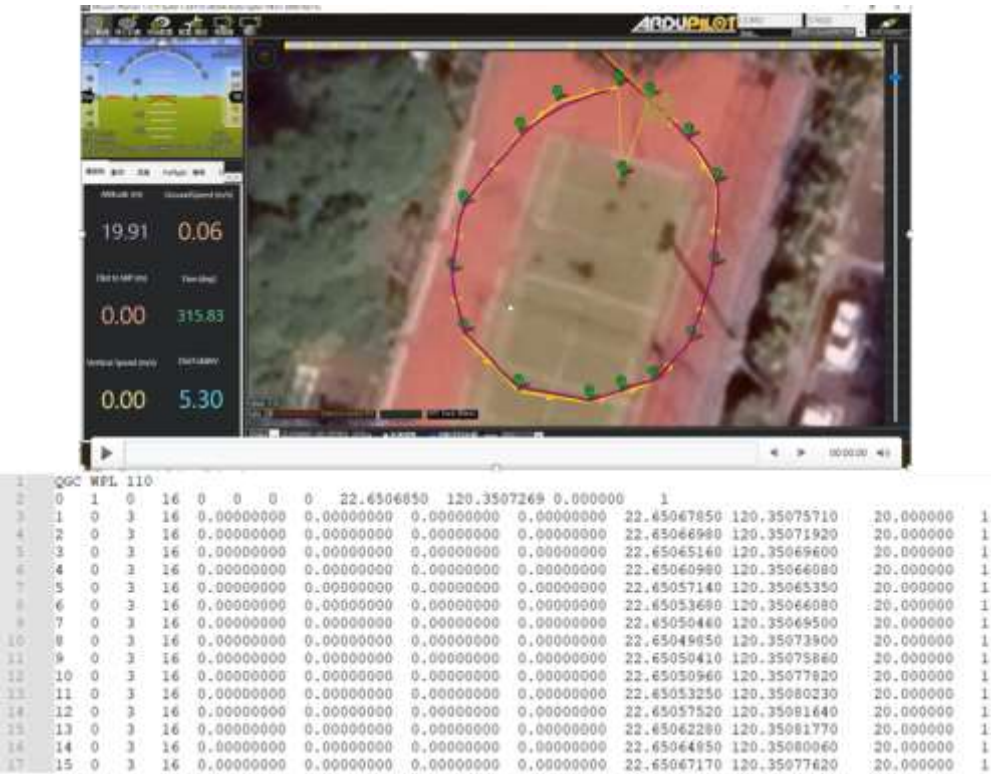


圖 4.15 單點環飛校園實際測試路徑成果與所對應 Mavlink 檔

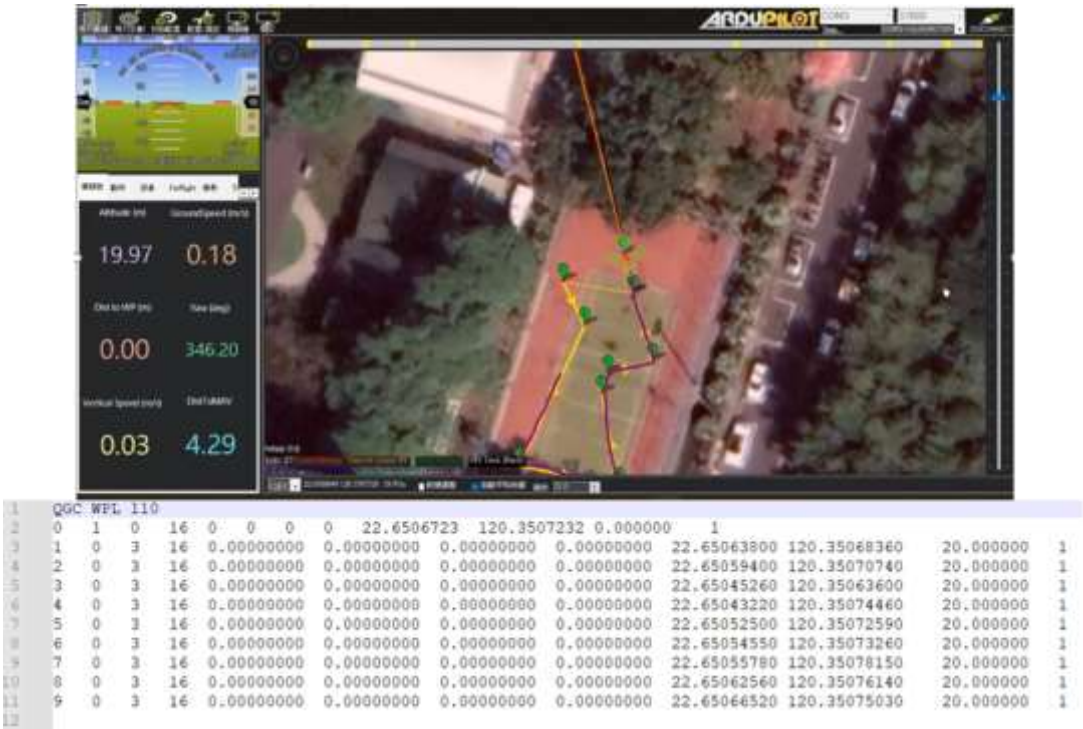


圖 4.16 多點巡航校園實際測試成果路徑與所對應 Mavlink 檔

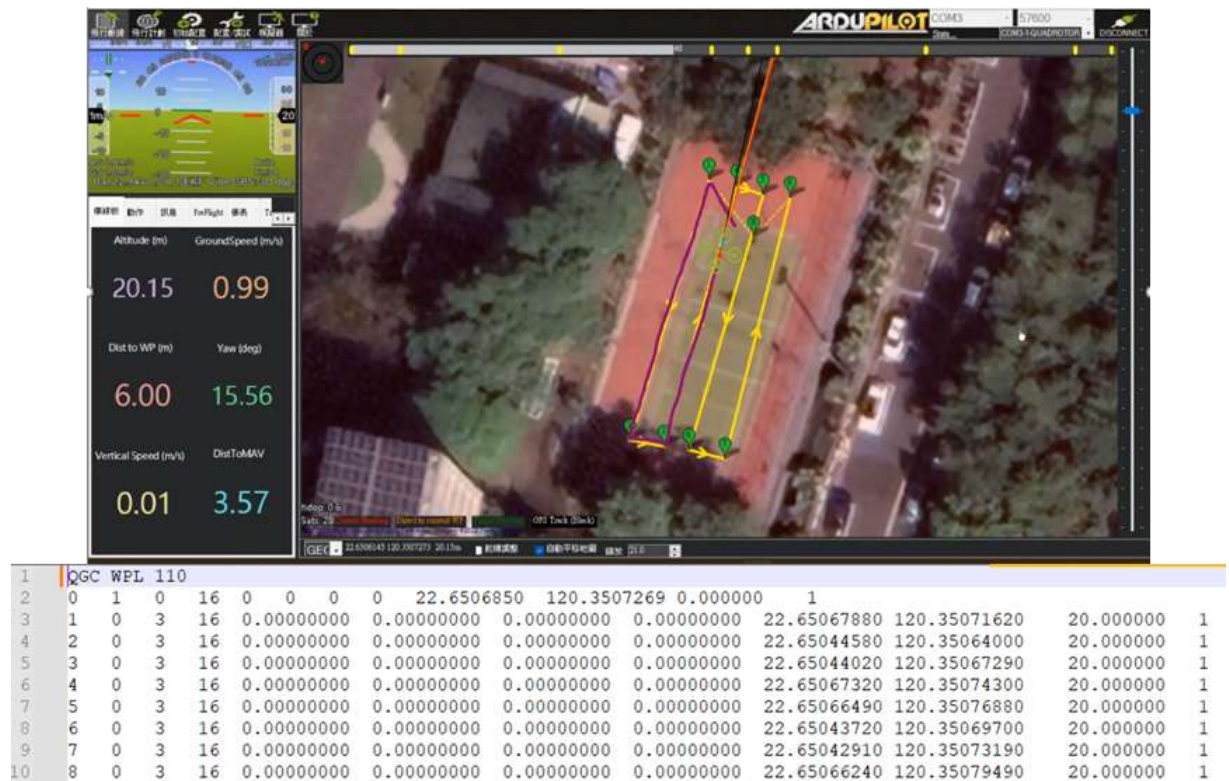


圖 4.17 地形測繪校園實際測試成果路徑與所對應 Mavlink 檔

4.4 無人機自主跟隨技術開發

4.4.1 原理介紹

本節將介紹無人機自動跟隨系統架構如何設計，硬體架構圖如圖 4.18所示，整個系統設計構想為使用高精度儀中Rpi 4B及Arduino 模組模擬人操控無人機，取代人為操控以達到自動飛行之目的。使用者端(被跟隨者)會有無人機遙控器及UWB tag，在遙控器上有一開關對應到接收器與Arduino之間串行通信通訊協定S-BUS之channel 9，將其channel 9值做為跟隨之開關，Arduino會根據被跟隨者的channel 9值進而操作於手控及自動跟隨模式兩種。

無人機上會有UWB anchor四個安置於四軸之最遠端，Rpi 4會透過USB線從Anchor 0讀取無人機與待測物之間的四個距離，二階段三角定位法之第一步驟計算待測物二維坐標，再轉換成相對於無人機中心之方位及距離，之後將方位及距離資訊代入閉迴路控制系統，如圖 4.19，方位及距離資訊會做為負回饋與設定航向相扣得出誤差值，再代入PID控制器(Proportional Integral Derivative)產生控制訊號

控制無人機，無人機轉向後再進行定位計算取得方位及距離資訊，以此不停進行此閉迴路控制，使得無人機能自動保持與待測物之設定方位及距離。

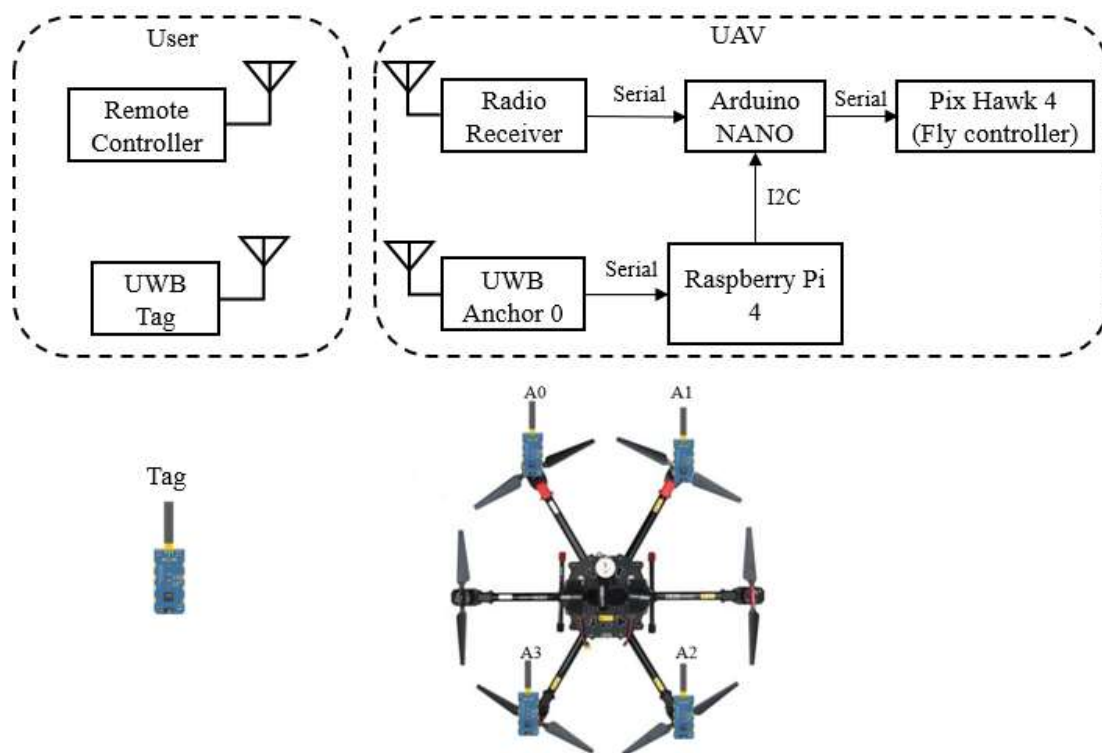


圖 4.18 人機自動跟隨系統硬體架構圖

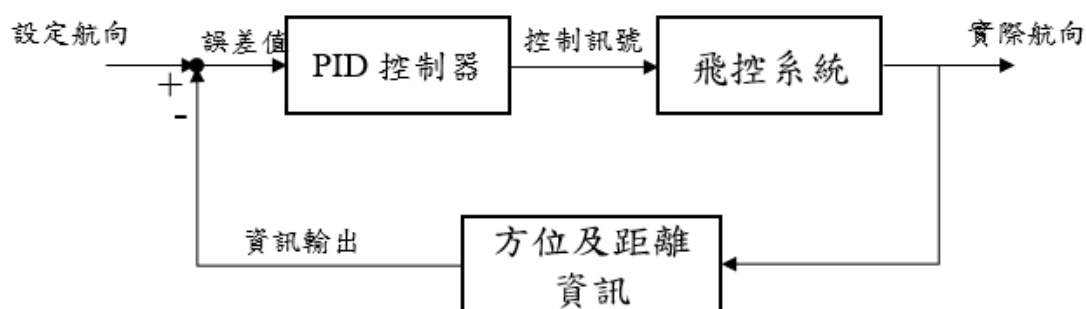


圖 4.19 閉迴路控制系統方塊圖

無人機自動跟隨系統實體架設圖如圖 4.20所示，UWB模組使用中心頻率4GHz，頻寬500MHz之頻段進行測距。而遙控器使用2.4GHz頻段，傳送控制訊號由接收器接收，而接收器所使用之串行通訊協定為SBUS使用反向串行邏輯，而Arduino之串行協定為UART使用正向串行邏輯，故需要使用反向器將訊號反轉才能進行溝通。Arduino讀取進來的每個封包有25個符號，每個符號由12個位元所組

成，依序為一個起始位元、八個資料位元(資料位元組)、一個偶數檢查位元及兩個結束位元，而25個資料位元組內有22資料位元組才是我們所控制之數值，另外三個位元組作為起始位元組、結束位元組及無線電檢查位元組。將這22個資料位元組轉換成以11位元為一組之channel，則有16個channel。而在16個channel內，我們所想控制之roll、pitch、油門、raw及跟隨開關對應到channel 1, 2, 3, 4, 9。

最後由Rpi 4B送控制變量給Arduino，再由Arduino產生封包再經反向器後送給飛控板，此為透過逆向工程了解訊號之封包內容並自行產生訊號以進行控制，而Arduino會依據channel 9(遙控器上開關)之狀態值去選擇手控模式或跟隨模式。圖 4.20無人機端下方有一Feather M0 with LoRa以及GPS模組，LoRa模組使用915MHz頻段將GPS坐標透過LoRa傳回基站，以紀錄整體跟隨實驗過程，此部分模組同樣也為高精度定位儀內之模組。

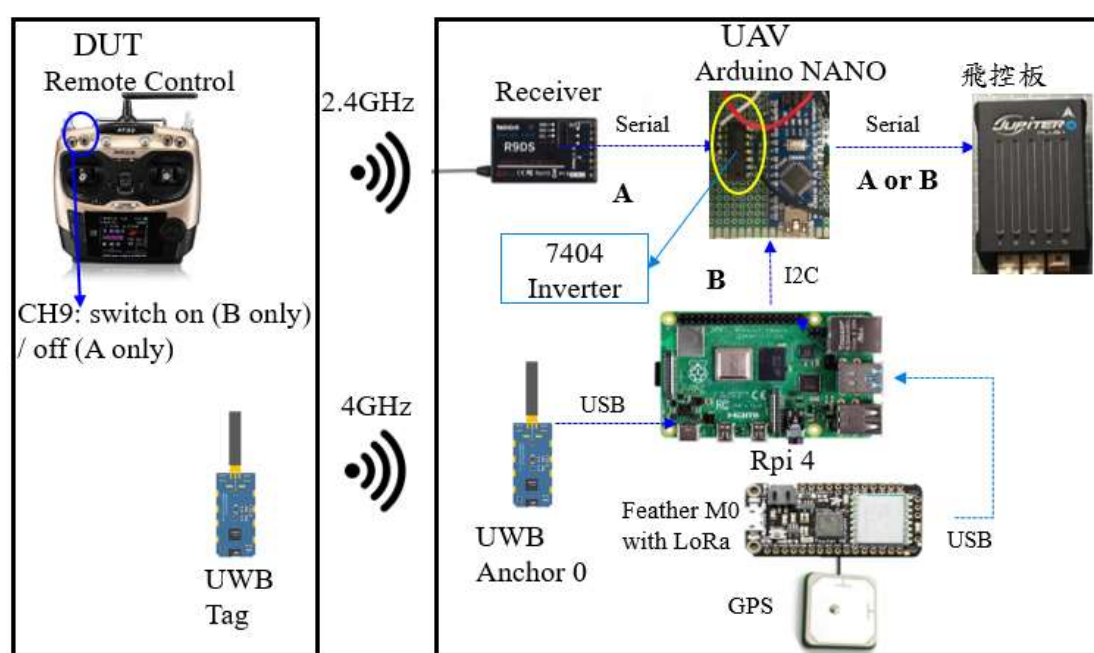


圖 4.20 無人機自動跟隨系統實體架設圖

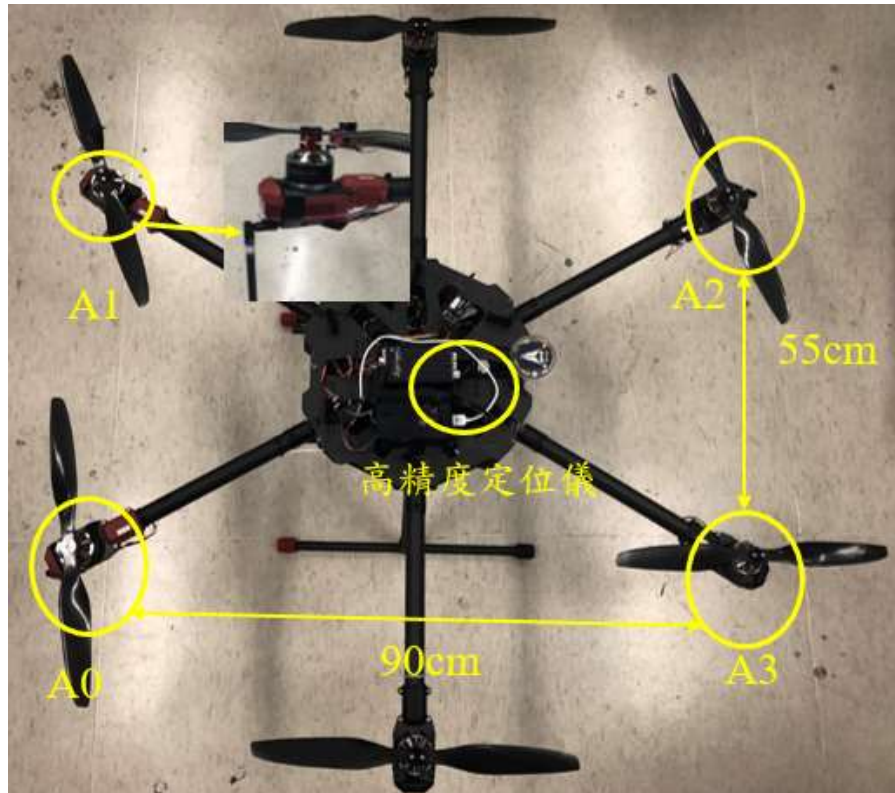


圖 4.21 自主跟隨式無人機上視圖

完成組裝的無人機如圖 4.21所示，將四個UWB架設於其中四個軸上，形成一長寬為90cm x 55cm之長方形，其電力來源由無人機之鋰電池22.2伏特降壓至5伏特進行供電，而高精度定位儀則放置於無人機中心，同樣由無人機之鋰電池22.2伏特降壓至5伏特進行供電。

4.4.2 實地測試成果

實地測試選定為臺中港環港北路進行試驗，本計畫依據二種不同情境進行了實地測試。測試日期為2022年9月23日，如圖 4.22所示，第一種案例採用跟隨人的方式進行，設置人與無人機距離為20公尺，也就是固定跟隨距離，確保人員安全行。人的行走速度約為1 km/hr~2 km/hr; 無人機之航高設置為15公尺高; 測試成果如圖 4.23所示，共計跟隨50公尺，拍攝視角為垂直向下正拍，模擬道路巡檢情境。在這個情境中，無人機能確實依照人行走的路線前進，並保持固定間距，但在飛行過程中仍會受到側風的影響，導致無人機有左右偏移之情行。

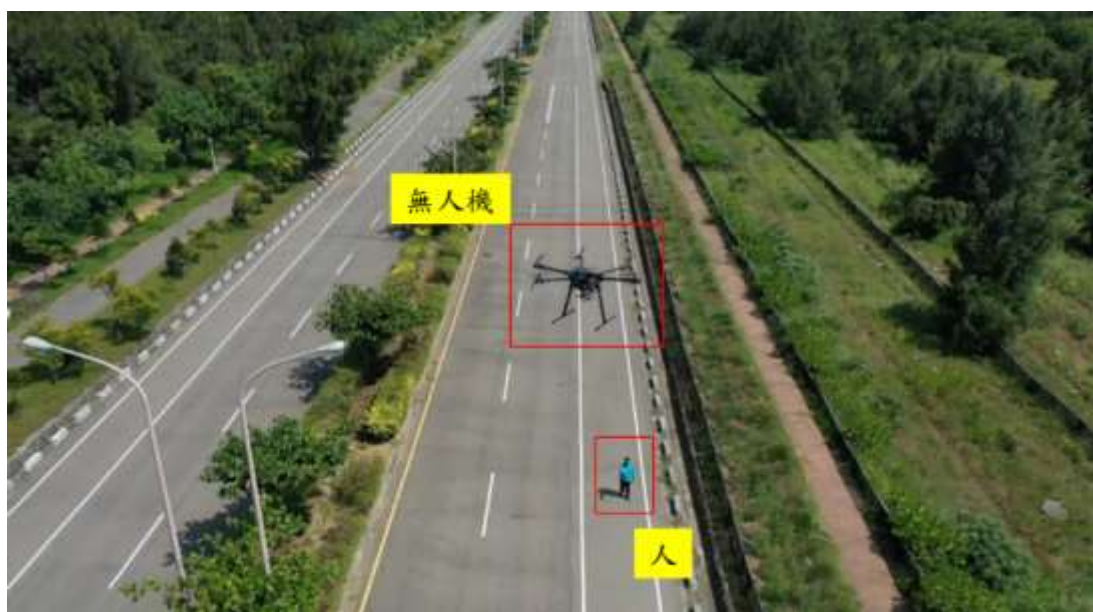


圖 4.22 CASE1 無人機跟隨人行走實測



圖 4.23 CASE1 跟隨路徑與拍攝視角

第二種案例採用跟隨車的方式進行，如圖 4.24所示，設置車與無人機距離為20公尺，也就是固定跟隨距離，確保安全飛行距離。車的速度約為5 km/hr~10 km/hr；無人機之航高設置為20公尺高；測試成果如圖 4.25所示，共計跟隨100公尺，拍攝視角為垂直向下正拍，模擬道路巡檢情境。在這個情境中，無人機能確實依照車的行徑路線前進，並保持固定間距，但在飛行過程中仍會受到側風的影響，

導致無人機有左右偏移之情行。

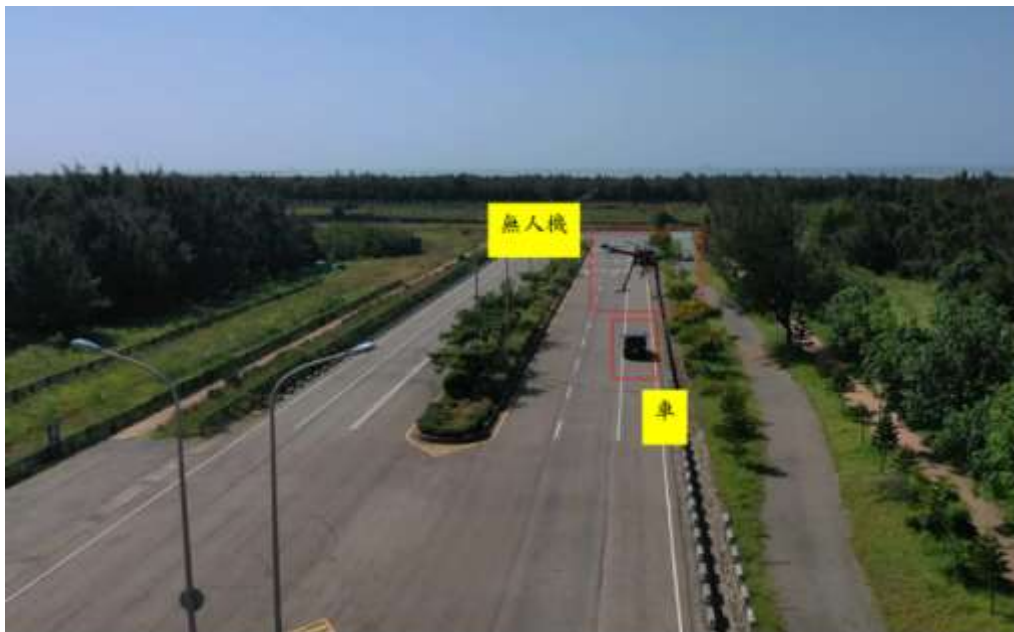


圖 4.24 CASE2 無人機跟隨人車輛行走實測



圖 4.25 CASE2 跟隨路徑與拍攝視角

4.5 本章小結

在本章節中，設計了不同模式下的飛行方法：地形測繪、多點巡航、單點環飛，並闡述了不同方法下所需要的參數設定，以及將

如何以A-star演算法進行航線規劃與進行避障功能，和後續可應用於不同的用途，建構之後實作時的明確流程與方法。在取像邏輯部分，說明了影像相關參數的意義與計算方法，能給予後續影像處理應用部分合理的影像參數調配與預期成果檢核。且在基於A-star演算法應用於本次研究，進行了細部改良，讓使用者能決定GSD加以動態計算出相對應飛行航高，並因不同飛機在GNSS定位上的誤差，提供對於緩衝區方面的微調空間，使飛行任務能更符合實際應用，最後總結此系統對於使用者需要輸入的參數，以及系統最後會顯示之參數，供後續影像處理使用。

無人機之載具控制與取像邏輯為相當重要之環節，無人機是否能依據所規劃之航線完成任務，為本章之核心關鍵。在無人機航線規劃的部份，透過安全實驗場地的測試，並設定三個主要的航線任務，皆能依照本計畫所開發之程式進行穩定飛行任務，這也代表無人機之軟硬體設備上能順利溝通並無產生任何錯誤。在無人機跟隨的部分，透過兩個案例之實測，無人機能穩定跟隨人與跟隨車輛飛行，並且能維持固定航高與固定跟隨距離。但在風速較大的港區環境，跟隨仍時會造成水平位移之效應，因此無人機的抗風穩健性設計是未來仍可持續精進之部分。

第五章 多時期UAV影像匹配辨識

透過UAV測繪技術完成現地影像蒐集，基於UAV空拍影像將進行空間屬性及幾何資訊建構，其中包括三維點雲、數值高程模型及正射影像建置；再者，UAV垂直地面所拍攝影像經與正射影像匹配，能獲得有效地理對位資訊外，亦能由影像糾正及套疊對位提供影像量測；最後，多期UAV影像藉由空間條件篩選，經由影像匹配比對挑選出相同地理位置之影像，提供使用者快速基於影像資訊進行比較。整體UAV影像辨識方法流程如下圖所示，除第一點已於2.1節說明外，其餘將於各小節中詳細說明。

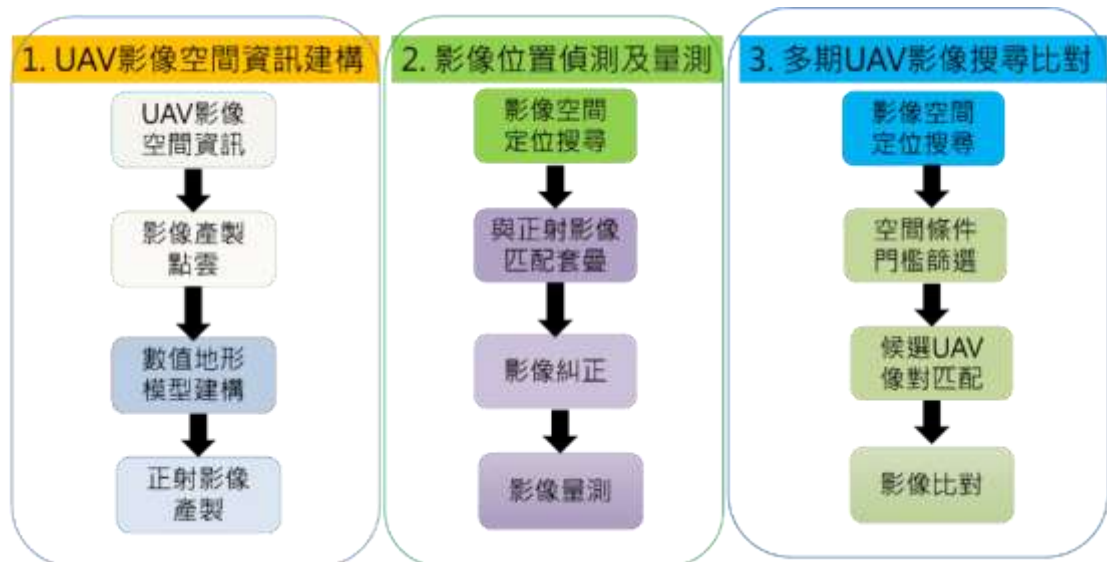


圖 5.1 UAV 影像辨識方法流程示意圖

5.1 UAV 影像定位資訊

UAV在巡檢拍攝的照片，可以在獲取拍攝當下UAV的經緯度、高度與GPS接收衛星數(表 5-1)來提供未來定位做資料使用；除此之外，相片資訊中也會記錄拍攝當下飛機姿態與相機姿態(表 5-2)，範例如下：



圖 5.2 巡檢照片範例

表 5-1 UAV 飛行經緯度與海拔高度

	緯度	經度	高度
GPS	24deg16'10.53" N	120deg31'16.27" E	7m

表 5-2 UAV 飛行旋轉角度與相機旋轉角度

	Pitch	Roll	Yaw
Drove	-9.195	-5.900	-66.246
Camera	-52.929	-0.032	-65.703

5.2 影像位置偵測及量測

建立物件偵測判定邏輯，標示特定物件位置、形狀以及尺寸，並藉由不同時期成果比較，判定物件變遷行為。UAV影像中具備包括地理定位、拍攝航高及視角資訊(詳見5.1節)，透過以上參考資訊做為初始位置偵測之約制條件(圖 5.3)，進而利用目標位置與候選影像參考地理定位之歐式距離，篩選候選影像之相關分級(式(12))。依本計畫UAV飛行調查為例，當距離小於30m時可達80%影像重疊率，

其範圍中的影像為主要目標；當距離於30m至60m間為高相關影像、60m至100m為中度相關。

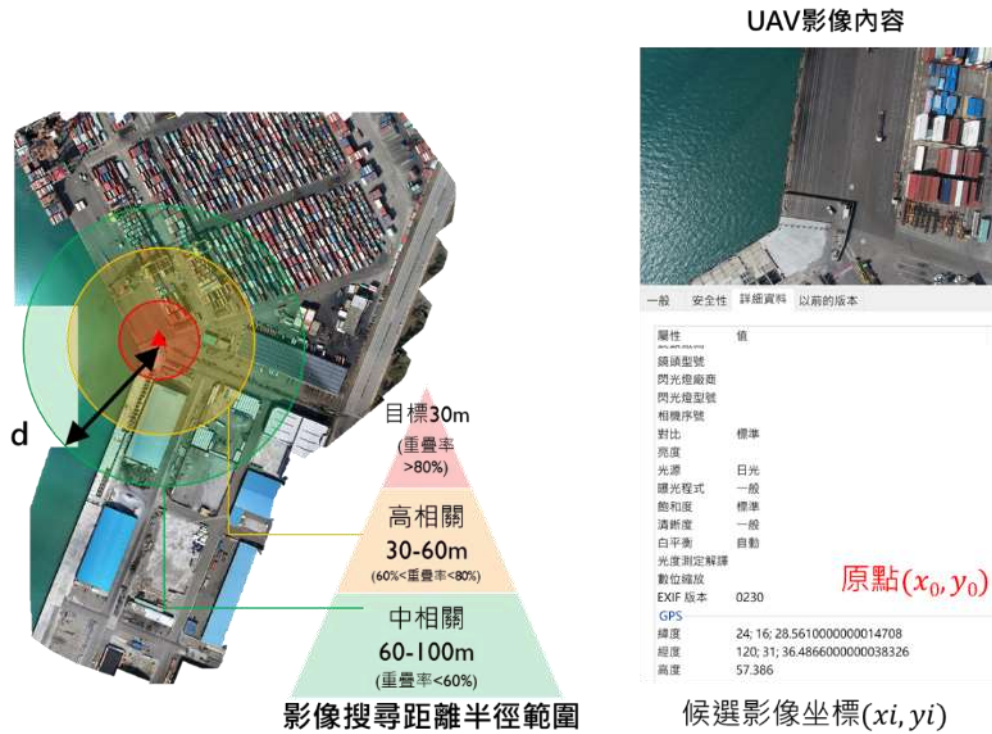


圖 5.3 依目標位置進行 UAV 候選影像相關性篩選示意圖

$$d = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (12)$$

其中 (x_0, y_0) 為目標位置、 (x_i, y_i) 為候選影像位置。

欲建立兩張同一區域但不同拍攝方位影像之關係，須找到兩張影像中皆存在「共同特色」共軛點位(稱之為特徵點位)做為匹配連結；然而不同相機感測器、拍攝航高與時間差異，造成拍攝影像呈不同色差、光線陰影及影像雜訊，增加影像間匹配錯誤率。本計畫提出特定物件辨識以及變遷偵測分析技術，將經由影像雜訊濾除局部陰影與色彩轉換等雜訊，以SURF偵測特徵點與匹配點位位置，利用匹配特徵點進行像幅仿射轉換，最後套疊兩幅影像，並提供人工辨識影像中變異。於下分別進行詳細說明。

為改善影像間色彩匹配穩定問題，本計畫首先透過彩色影像光

譜轉換反射強度(明度)處理，以反射強度值表現地物及地貌之材質屬性，RGB空間轉換為HSV空間(圖 5.4)，HSV包括色相、飽和度、明度如式(13)所示。

$$\begin{cases} hue(H) = \begin{cases} \theta & B \leq G \\ 360^\circ - \theta & B > G \end{cases} \\ Saturation(S) = 1 - \frac{3m}{(R+G+B)} \\ Intensity(I) = \frac{R+G+B}{3} \end{cases} \quad (13)$$

其中角度 $\theta = \arccos \frac{[(R-G)+(R-B)]}{2\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}}$ 、 m 為紅、綠、藍三項最

小值。

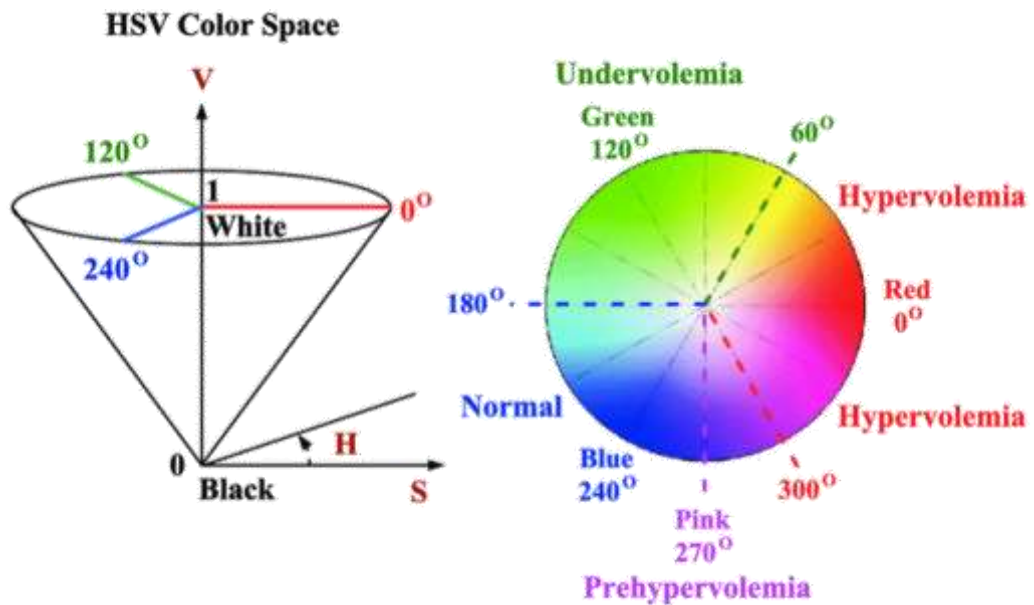


圖 5.4 影像色彩 RGB 與 HSV 轉換角度涵蓋圖

如圖 5.5所示，UAV彩色影像經由HSV轉換並萃取獲得影像中明度資訊，透過該資訊可穩定且顯著傳達地表材質特性，如金屬材質、粗糙路面、人工構造物、水體等。

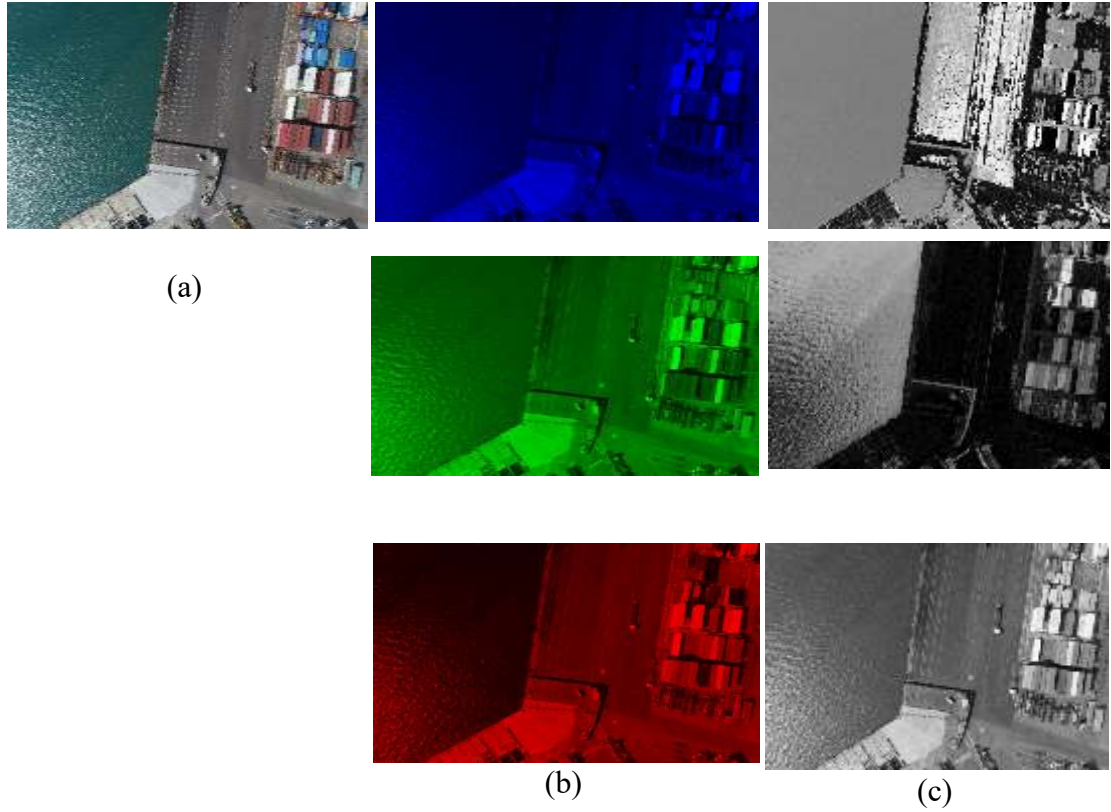


圖 5.5 UAV 彩色影像萃取明度資訊圖(a)原始 UAV 影像、(b)紅綠藍光譜影像、(c)色相、飽和度及明度影像

影像紀錄反射光譜資訊同時也包括許多雜訊，主要雜訊包括高斯雜訊(Gaussian noise)和椒鹽雜訊(impulse noise)，其中明顯的椒鹽雜訊具隨機性，而且可能成為顯著特徵增加匹配辨識困難度，因此需透過濾波器進行降噪處理。眾多濾波器中，中值濾波器為一非線性濾波器，以預設罩窗值域中之中數值做為輸出，保存邊緣特性同時降低斑點及椒鹽雜訊(Hall, 2007)，其運算如式(14)所示。

$$V(i, j) = \text{med}[v(i-1, j+1), v(i, j+1), \dots, v(i, j), \dots, v(i, j-1), v(i+1, j-1)] \quad (14)$$

其中， V 為罩窗中央之影像明度值、 v 為原始影像之明度值、 i 為列數、 j 為行數。

透過影像RGB-HSV轉換及雜訊率除後，以SURF進行影像特徵偵測，其中SURF匹配計算包括主方向與描述元的建構。主方向的建立以尺寸為 $4s$ 的Haar小波計算該特徵點，半徑 $6s$ 內的水平與垂直方向的響應值(response)， s 為該點對應的尺度。接著以該點為中心，利用高斯權重對Haar小波的響應值進行加權($\sigma = 2s$)，計算完畢後再

以60 度的扇形滑動罩窗進行加總，估計出該特徵點的主方向(圖 5.6)，主方向的建立是為了讓特徵點在匹配時具備旋轉不變性。計算描述元在主方向確立後便以特徵點為中心，沿著主方向上建立一個尺寸為20s 的罩窗，並將該罩窗分為4x4 的子區域，Haar 小波在計算時又將每個子區域分為2x2 小區塊(圖 5.7)，在每個小區塊上可得到dx、dy的數值，並且為了增加特徵點在幾何變形與定位誤差的穩健性，再以特徵點為中心進行高斯權重($\sigma = 3.3s$)的加權，最後將每個子區域的dx 與dy 進行加總得到每個子區域的特徵向量。又為了抵抗影像灰階值變化的問題而加入 $|dx|$ 、 $|dy|$ ，因此最後在每一個子區域可獲得4 個維度的描述元向量 $v=(\sum dx, \sum dy, \sum |dx|, \sum |dy|)$ ，因此在4x4 的子區域中，每個特徵點的特徵向量長度為64(4x4x4)，再由特徵長度進行匹配，實際UAV影像於正射底圖中匹配偵測位置如圖 5.8所示。

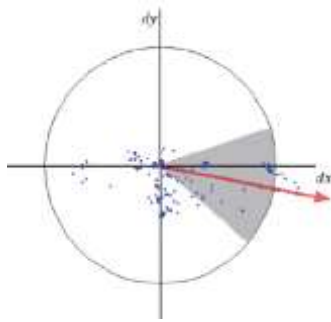


圖 5.6 SURF 主方向(Bay et al, 2008)

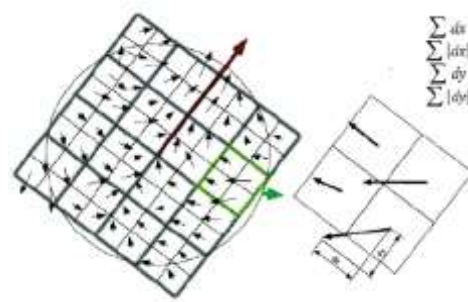


圖 5.7 SURF 描述元(Bay et al, 2008)

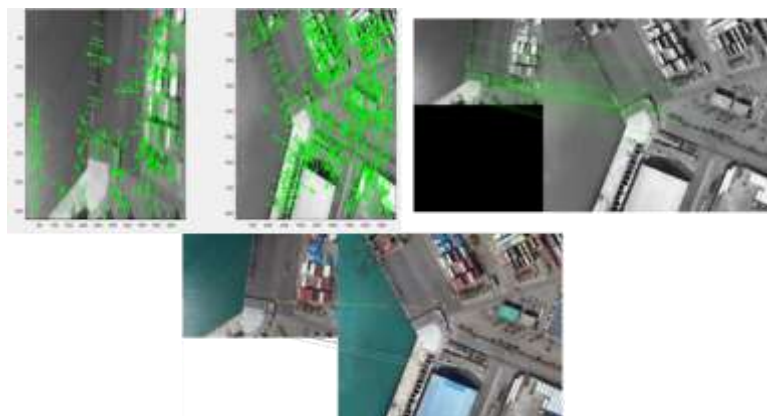


圖 5.8 UAV 影像中描述元方向及匹配偵測圖

UAV影像經匹配獲得特徵點由相似轉換進行影像糾正，相似轉換建立了兩張影像之尺度、旋轉與位移關係表示如式(15)所示。

$$\begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \cos \theta & -S \sin \theta & \Delta x \\ S \sin \theta & S \cos \theta & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中 (x_i, y_i) 為原始影像坐標、 (x_i', y_i') 為改正後影像坐標、 $(\Delta x, \Delta y)$ 為平移參數、 S 為尺度、 θ 為旋轉角。

實際UAV影像經與正射底圖進行匹配，再由正確匹配點進行影像糾正，經糾正之UAV影像套疊圖層如圖 5.9所示，多期的UAV影像經由上述分析流程，可提供管理單位進行影像在地理對位條件下進行屬性變化比較，同時可提供影像直接進行平面幾何量測(圖 5.10)。

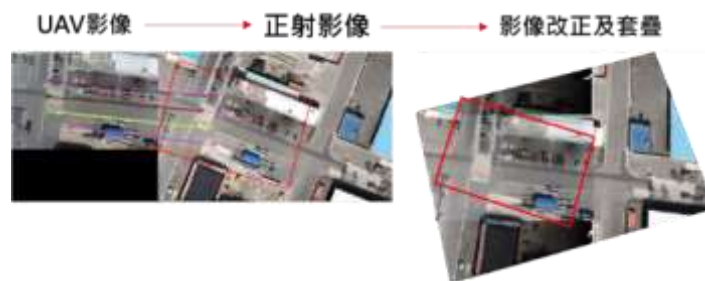


圖 5.9 糾正後 UAV 影像套疊於正射底圖

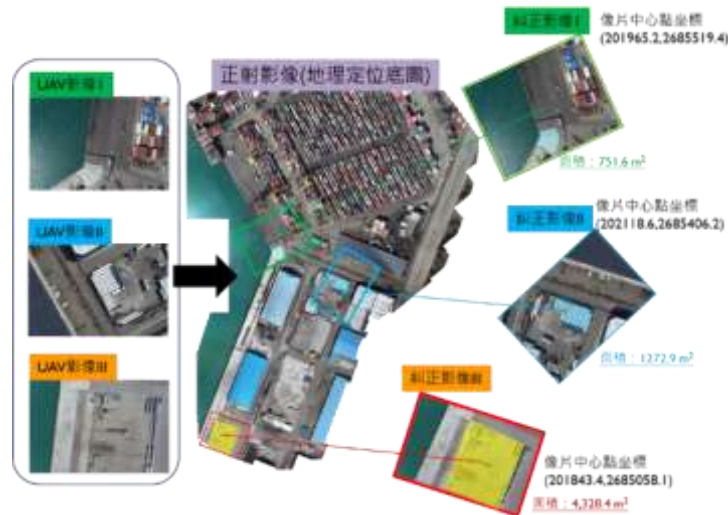


圖 5.10 多期糾正後 UAV 影像提供地理定位及量測資訊

5.3 多期 UAV 影像搜尋及比對

人類在辨識物體時，並非直接觀察影像像素值(pixel value)，而

是從中抽取更高階的資訊，如特徵點或線段進行判斷，因此 Riesenhuber and Poggio(1999)在早期有了以電腦從影像提取特徵的研究，模擬人類視覺皮質的運作。而在特徵檢測的步驟，需要在影像中尋找特殊位置的關鍵點(或稱共軛點、特徵點)，如邊緣點、角點或斑點(blob)等。特徵檢測子(detector)需具備良好的重複率(repeatability)，使得無論在不同傾角與尺度拍攝的影像上，仍然可以找到不變的特徵點(Schmid, 2000)。

Bay et al.(2006)提出SURF演算法，改良尺度不變特徵轉換演算法(scale-invariant feature transform, SIFT)運算時間太長的缺點，並對DoH(Determinant of Hessian)中的高斯二階微分操作視窗進行簡化和近似。有別於SIFT演算法中使用DoG對LoG(Laplacian of Gaussian)進行簡化，SURF作法為以積分影像與9×9盒子濾波(box filter)，逼近二階高斯微分以建立尺度空間，再利用Hessian矩陣獲取各種不同尺度下的特徵點，如圖 5.11所示。

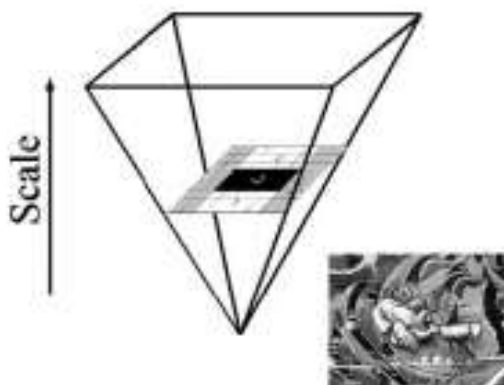


圖 5.11 SURF 特徵檢測(Bay et al., 2006)

SURF演算法使用快速Hessian特徵點偵測器以及在特徵點附近先以Haar小波響應(wavelet response)確立主方向，再描述特徵點藉此提高特徵點匹配的速度。SURF特徵描述子在產生特徵向量時，使用的則是積分影像，其優點是可充分利用特徵點檢測時形成的積分影像，避免在產生特徵向量時對影像重複運算(Bay et al., 2008)。研究顯示若影像像對具備旋轉、平移、仿射轉換等特性，Juan and Gwun (2009)指出SURF演算法不論是在運算時間或是對於明亮度的穩健性皆有較佳的成果。

5.3.1 三種影像改正分析

本計畫計畫共採用三種影像改正方式執行後期UAV傾斜影像修正，包括相似轉換(similarity transformation)、仿射轉換(affine transformation)及投影轉換(projection transformation)。避免轉換後影像與基期影像產生過大形變問題，於此加入影像改正門檻條件，其規則為修改後期影像大小平移不大於原始影像大小之四分之一；換言之，兩期影像景象內容及特徵需達到75%以上共同涵蓋範圍，於下分別說明三種影像改正分析。

(1) 相似轉換改正

匹配獲得原始影像與預備改正影像間共軛特徵點，依此作為像對參數，透過影像相似轉換進行影像改正，影像改正過程中能保持形狀不變，即是圖形對應線段擴大或縮小相同倍數，而不改變圖形中每一個角度大小，經相似轉換影像與原始影像之共同物件面積呈縮放等比平方關係(式(16))。

$$X' = M^{-1}XM + \Delta \quad (16)$$

其中X為原始影像資訊、X'為改正後影像資訊、M為相似轉換方陣、 Δ 為平移參數。

(2) 仿射轉換改正

匹配獲得原始影像與預備改正影像間共軛特徵點，依此作為像對參數，透過影像仿射轉換進行影像改正，其轉換分析為建立了兩張影像之尺度、旋轉與位移關係，表示如式(17)所示。仿射轉換能保有影像內容中點之間的共線性、直線的平行性及平行線段長度比例。

$$\begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \cos \theta & -S \sin \theta & \Delta_x \\ S \sin \theta & S \cos \theta & \Delta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中 (x_i, y_i) 為原始影像坐標、 (x_i', y_i') 為改正後影像坐標、 $(\Delta x, \Delta y)$ 為平移參數、S為尺度、 θ 為旋轉角。

(3) 投影轉換改正

匹配獲得原始影像與預備改正影像間共軛特徵點，依此作為像對參數，透過影像投影轉換進行影像改正，其轉換分析建立兩平面場之間及鄰域雙向連續點對應關係，常用於照相、縮放儀、光學投影和格線等轉繪法，以達到地圖投影變換目的。根據兩投影間的若干離散點或稱共同點，運用數值逼近理論建立點間轉換函式關係，或直接求出變換點的坐標(式(18))。

$$\begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \\ z_i' \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} 1 & a_z & -a_y \\ -a_z & 1 & a_x \\ a_y & -a_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中 (x_i, y_i) 為原始影像坐標、 (x_i', y_i') 為改正後影像坐標、 z_i' 及 z_i 於二維影像中設定為相同定值、 S 為尺度、 a 為xyz三軸投影轉換矩陣、 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 為位移參數。

5.3.2 中突堤隨機 POI 多期影像改正案例測試

圖 5.12為港區UAV影像管理與分析平台中突堤區域截圖，並於該區域POI點位中分別挑選三個案例，進行說明多時期UAV傾斜影像改正，其中案例一、二為中突堤西側、案例三為中突堤東側，POI點位中紀錄多期UAV傾斜影像調查時間，基期影像為2021年11月11號上午8點蒐集，第二期影像為2022年4月22號上午10點蒐集，於下說明三個案例影像改正成果。



圖 5.12 港區中突堤區域設施巡檢 POI 點分布及多期影像圖

(1) 案例一、POI編號253

案例一(圖 5.13)中兩期影像顯示具相近拍攝方向及俯角，圖中透過匹配偵測期共軌特徵點以黃色線對應連結，這些點位大多分布於圖像上方建物及風扇設施等固定特徵位置；此外，初步肉眼明顯觀察到影像中船隻近似相同，但並未獲得任何偵測共軌特徵，亦推得兩期並非同一艘船支。兩期共同範圍以紅框標示，偵測成果達95%以上共同重疊範圍。案例一中以仿射轉換及投影轉換成功獲得第二期影像改正，其中又以投影轉換對於遠方場景進行明顯改正(圖 5.14)。



圖 5.13 POI 編號 253 兩期影像匹配特徵點及偵測共同範圍圖(左為基期影像、右為第二期影像)



(a)仿射轉換



(b)投影轉換

圖 5.14 POI 編號 253 第二期影像改正成果圖

(2) 案例二、POI編號262

案例二中第二期影像較基期影像觀測到較多左側場景資訊，圖 5.15 中透過匹配偵測期共軌特徵點以黃色線對應連結，這些點位大多分布於圖像上方建物及風扇設施等固定特徵位置；此外，初步肉眼明顯觀察到影像中為不同船隻，透過特徵偵測與匹配亦無分布於此區域。兩期共同範圍以紅框標示，偵測成果達90%以上共同重疊範圍。案例二中三種轉換演算皆成功改正第二期影像，其中以投影轉換改正幅度最為明顯、仿射轉換次之、相似轉換最少(如圖 5.16)。



圖 5.15 POI 編號 262 兩期影像匹配特徵點及偵測共同範圍圖(左為基期影像、右為第二期影像)



(a)相似轉換



(b)仿射轉換



(c)投影轉換

圖 5.16 POI 編號 262 第二期影像改正成果圖

為了比較基期影像與改正影像間幾何分佈差別，於基期影像中均勻標註物件分布如下圖 5.17所示，並量測該物件於影像中長度，同時於三種轉換改正影像中量測該物件長度。經量測成果統計如下表 5-3所示，其中物件長度以投影轉換影像最接近基期影像(長度差異界於0至35個相素)、仿射轉換次之(長度差異界於22至70個相素)、相似轉換差異最大(長度差異界於26至106個相素)。



圖 5.17 POI 編號 262 基期影像中物件編號位置說明圖

表 5-3 POI 編號 262 基期及改正影像中物件尺寸統計表

單位：像素

物件編號	基期影像	相似轉換影像	仿射轉換影像	投影轉換影像
1	1646.0	1620.4	1624.1	1646.0
2	1356.5	1338.1	1341.8	1352.8
3	2391.7	2285.6	2321.0	2356.3

(3) 案例三、POI編號421

案例三中第二期影像較基期影像觀測較多左側場景資訊且拍攝較遠於港區陸地，圖 5.18中透過匹配偵測期共軌特徵點以黃色線對應連結，這些點位大多分布於圖像上方及左側建物設施角點等特徵位置；由肉眼明顯觀察到影像中為不同船隻，透過特徵偵測與匹配亦無分布於此區域。兩期共同範圍以紅框標示，具80%以上共同重疊範圍。案例三中三種轉換演算皆成功改正第二期影像，其中以投影轉換改正幅度最為明顯且最貼近基期拍攝視角，仿射轉換次之而相似轉換則微量改正，成果如圖 5.19。



圖 5.18 POI 編號 421 兩期影像匹配特徵點及偵測共同範圍圖(左為基期影像、右為第二期影像)

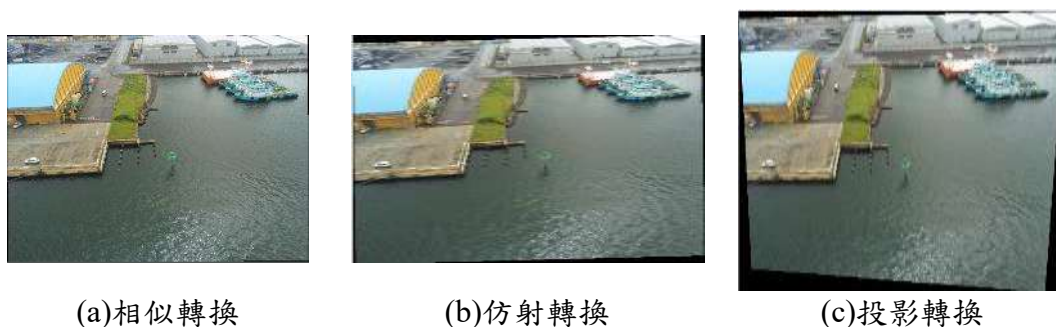


圖 5.19 POI 編號 421 第二期影像改正成果圖

比較基期影像與改正影像間幾何分佈差別，於基期影像陸域範圍由上至下均勻標註物件分布，如下圖 5.20所示。經量測基期影像與三種改正影像中物件長度，成果統計如下表 5-4。其中物件長度以投影轉換影像最接近基期影像(長度差異界於4至7個相素)、仿射轉換次之(長度差異界於7至42個相素)、相似轉換差異最大(長度差異界於92至106個相素)。



圖 5.20 POI 編號 421 基期影像中物件編號位置說明圖

表 5-4 POI 編號 421 基期及改正影像中物件長度統計表

單位：像素

物件編號	基期影像	相似轉換影像	仿射轉換影像	投影轉換影像
1	864.5	771.7	871.9	868.2
2	1215.9	1087.9	1237.2	1219.5
3	1460.0	1263.7	1502.9	1452.9

5.4 本章小結

基於無人機拍攝影像地理定位及色彩資訊，依物像共線及影像立體視覺化分析建構數值高程模型及正射影像，由彩色資訊萃取影

像強度(明度)資訊獲得地表屬性特徵，以雜訊濾除罩窗維持影像品質之穩定。基於上述影像資訊強化處理後，利用SURF影像特徵偵測與匹配獲得UAV影像與正射影像間的特徵連結，藉由地理定位及套疊垂直地面拍攝之UAV影像於正射影像中，以投影轉換糾正UAV影像提供多時期影像進行長度及面積量測比較；另外，非垂直地面拍攝之UAV影像將依其他相關輔助定義資訊如：方位角、位置、航高及仰俯角進行預先區分類別，進而依類別進行UAV影像匹配比對，達到多時期UAV影像監測空間變遷行為目的。

第六章 多時期UAV影像智慧化分析

6.1 多時期 UAV 影像智慧化分析流程

AI自動物件辨識流程分為兩部分，模型訓練與完成訓練後使用模型進行多時期UAV影像智慧化分析。模型訓練透過UAV進行影像蒐集作為資料來源，人工將影像對欲辨識之目標物進行資料標註後做為模型訓練的資料集使用（如圖 6.1）。

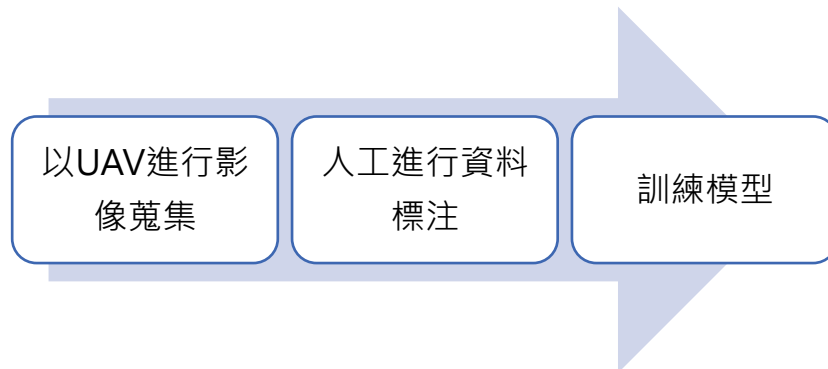


圖 6.1 模型訓練流程

多時期UAV影像智慧化分析的流程如圖 6.2，同樣經過UAV進行影像蒐集後，以系統設立之POI點坐標進行篩選，挑選最靠近之影像作為POI點的新期影像，新期的POI影像經過智慧化影像辨識後找出欲辨識之標的物，而後根據不同目標物進行獨立的智慧化分析。

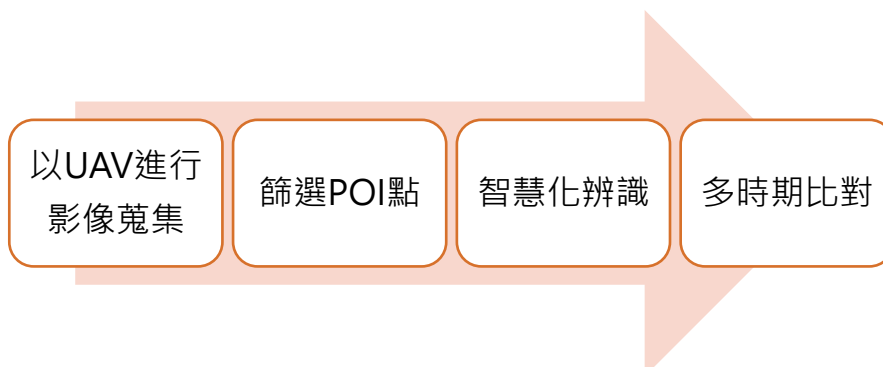


圖 6.2 影像智慧化分析流程

6.2 多時期 UAV 影像智慧化分析選擇之標的物

6.2.1 港區道路區域選擇之標的物

道路設施與道路鋪面的損壞會影響行車之安全，考量各設施的損壞對道路行車安全的影響嚴重性，本計畫在港區道路區域所選擇的標的物有路燈、紅綠燈、人手孔蓋、道路鋪面標線與道路鋪面上的裂縫和坑洞。

6.3 物件辨識模型選擇項目

深度學習運用於影像分析依照目標主要可分為四大類：影像辨識、物件偵測、語意分割與實例分割。影像辨識的任務目標為輸入一張影像，模型輸出該影像所屬的類別；物件偵測的任務目標為輸入一張影像，模型輸出影像中物件的位置與所屬類別，並以物件框(Bounding Box)標示；語意分割的任務目標為輸入一張影像，模型輸出影像中每一像素所屬的類別，換言之將影像轉換成高階語意；實例分割與物件偵測類似，但不僅只以物件框標示物件，而是更進一步找出物件的輪廓，任務目標為輸入一張影像，模型輸出影像中物件的位置、所屬類別及物件的輪廓。

本計畫依照各目標特性與後續多時期比對分析所需資訊選擇物件偵測、實例分割和語意分割進行物件辨識，針對各目標分別進行任一偵測或整合多項偵測模型進行偵測（如表 6-1），各目標所選擇的模型架構將於本章節中分別闡述。

表 6-1 本計畫目標物

項目	方法	實施之多時期檢測邏輯	說明
道路標線	實例分割	不同時期道路標線之損壞程度	道路分向線、禁止變換車道線、行車分向線、車道線、停止線、指向線
人手孔蓋	物件偵測	不同時期物體存在與否、物體位置是否發生偏移	以北堤路設施樣式為目標
岸邊設施	實例分割	不同時期存在與否、物體損壞與否	包含車擋、反光板與碰撞墊，以 20-25 號碼頭設施樣式為目標
道路鋪面裂縫	語意分割	以裂縫數量與裂縫寬度統計出路況損壞程度	以北堤路設施樣式為目標
路燈	物件偵測	不同時期存在與否、是否發生變形偏移	以北堤路設施樣式為目標
紅綠燈	物件偵測	不同時期存在與否、是否發生變形偏移	以北堤路設施樣式為目標

6.4 物件辨識模型選擇

數位影像自動化辨識有三種任務目標，物件偵測、實例分割與場景分割，用於這三種任務的深度學習模型也不斷的被提出。在本計畫中，根據辨識目標的性質與所希望的偵測結果，會從上述三種種類中選一最適切的來進行辨識，所選用的深度學習模型如下。

6.4.1 U net

如圖 6.3所示，U-net 是一種基於Fully Convolutional Networks (FCN) 架構下的類神經網路，都有encoder及decoder的部分，也分別在前者及後者做降維及升維，但傳統FCN有個問題就是在降維的過程中容易將一些特徵給遺失，因此U-net在這方面提出了一個解決方法，也就是在降維與也分別在前者及後者做降維及升維之間加入一個名為殘差連結（圖 6.3灰色箭頭）的連結，確保能把降維時所有的特徵留下來，提升預測表現。也因此目前的語意分割大部分都是用U-net架構的模型來進行，而本計畫這次使用的是Segmentation

Models 這個module所提供的U-net架構來做訓練及預測。

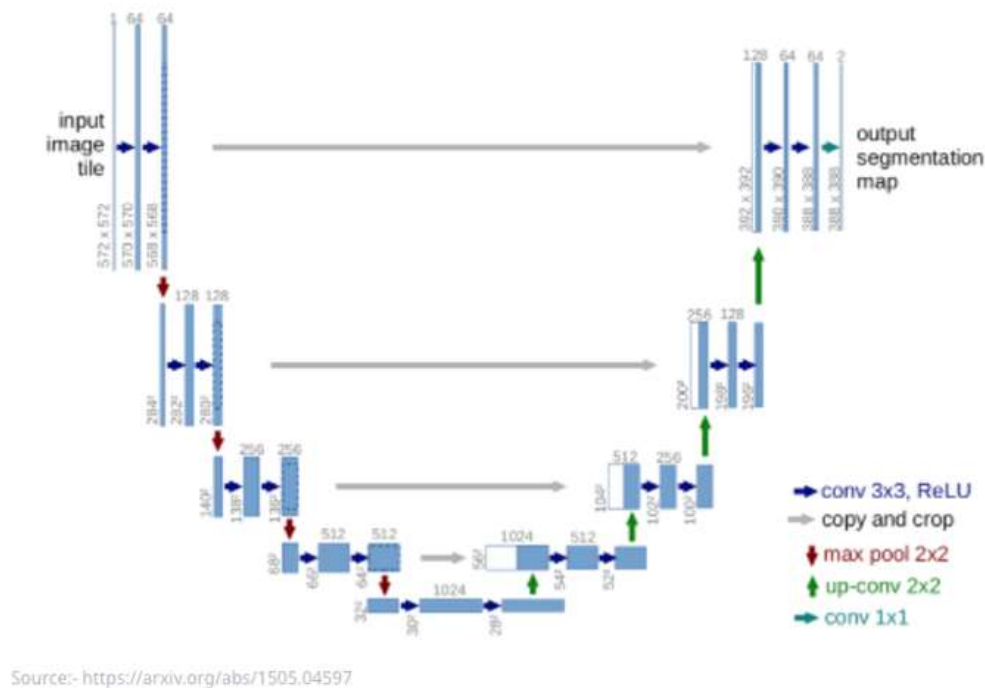


圖 6.3 U-net 架構

6.4.2 Feature Pyramid Network(FPN)

FPN是可用於語意分割的一種實作模型，模型結構如圖 6.4，經過多層的卷積網路下採樣(down-sampling)提取特徵，down-sampling結束後再透過上採樣(up-sampling)將經過卷積網路處理後的資訊恢復成原始影像大小，並識別出影像中每一像素所屬的類別。

FPN不同於U-net類型的結構僅將down-sampling的最後一層傳遞給up-sampling，而是在每次的down-sampling的過程都將結果傳遞出去，並up-sampling成原始影像大小，最後將所有up-sampling的結果合併預測。透過上述結構，FPN能更好的去分析多尺度的特徵，提升分割的成果。

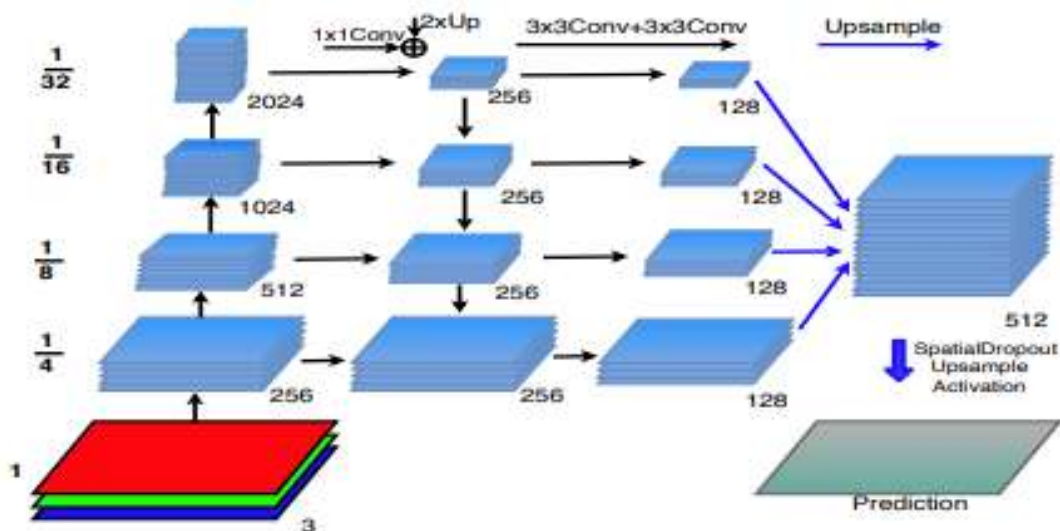


圖 6.4 FPN semantic segmentation 架構圖 (Seferbekov, S., et al., 2018)

6.4.3 實例分割 mask RCNN

Mask R-CNN是實例分割的實作模型之一。模型架構如圖3，透過卷積網路萃取影像特徵，並找出感興趣區域(Region of Interest, ROI)意即模型認為有可能有物件的區域，再透過影像辨識的方法識別出每一ROI所屬的物件，達到物件偵測的任務目標。

Mask R-CNN整體的架構延續物件偵測模型Faster R-CNN的架構，但在尾端新增一條分支對Fast R-CNN所得的ROI進行像素等級的遮罩分割(segmentation mask)，將模型輸出從物件偵測進一步做成實例分割。(圖 6.5)。

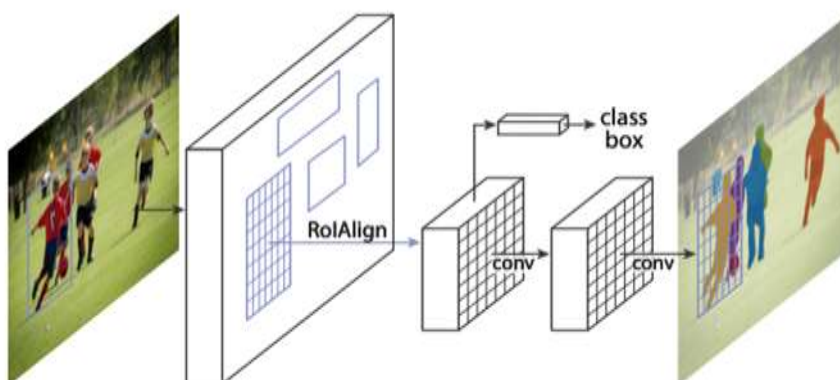


圖 6.5 Mask-RCNN 架構

6.4.4 物件偵測 YOLOv5

Yolov5是物件偵測的實作模型之一。模型架構如圖 6.6，透過卷積網路萃取影像特徵，同時偵測物件框位置與物件類別，達到物件偵測的任務目標。

Yolov5的架構改進自Yolov4，並且在輸入端、特徵萃取的基幹(backbone)、處理多尺寸輸入的頸部(Neck)與預測使用的損失函數(Loss function)上都有調整，達到更好的預測速度與準確率。

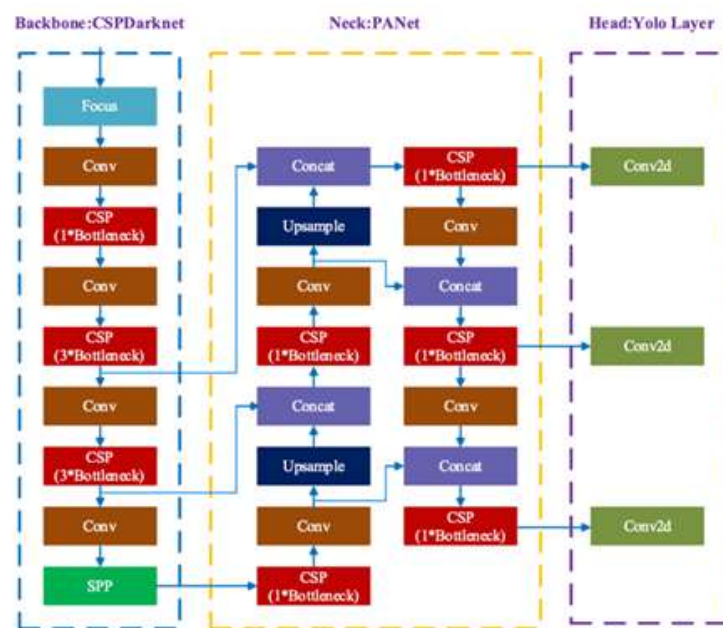


圖 6.6 Yolov5 架構 (Yiming Fang, et al., 2021)

6.5 岸邊設施自動化辨識分析

以單張POI影像為例，岸邊設施自動化辨識分析的流程如圖 6.7 所示。多時期對後提供的異變警示如圖 6.8所示，各顏色點代表位於該位置的物件缺漏或損壞。

為進行岸邊設施自動化辨識分析，本計畫利用Mask R-CNN進行實例分割，但UAV拍攝時需優先考量效率與安全問題，因此飛行高度不宜太低以避免飛機飛行時發生碰撞。以本計畫的港區飛行為例，為躲避岸邊船隻，每次巡檢所規劃之飛行高度為40公尺高，以此飛行高度所拍攝的岸邊設施於影像中過小，不易模型偵測。

為解決目標物於影像中過小的問題，本計畫先以FPN進行語意分割，找出影像中海與岸的交界處，岸邊設施都必定出現於交界處上下一定範圍內，以此方法可濾除不必要的資訊，譬如天空、建物與部分海洋，僅留下交界處上下一定範圍內的感興趣區域，增加目標物於影像中的佔比含量，而後再針對感興趣區域以Mask R-CNN做實例分割，偵測出目標物的位置、輪廓與像素面積，為進行多時期比對，以人工標註之POI基期影像作為比對基準，將新期POI影像透過投影轉換對齊與基期的影像坐標，而後進行多時期的缺漏比對與損壞判斷，在新期影像中標示出缺漏、損壞之發生位置，並輸出其對應的編號與類別。

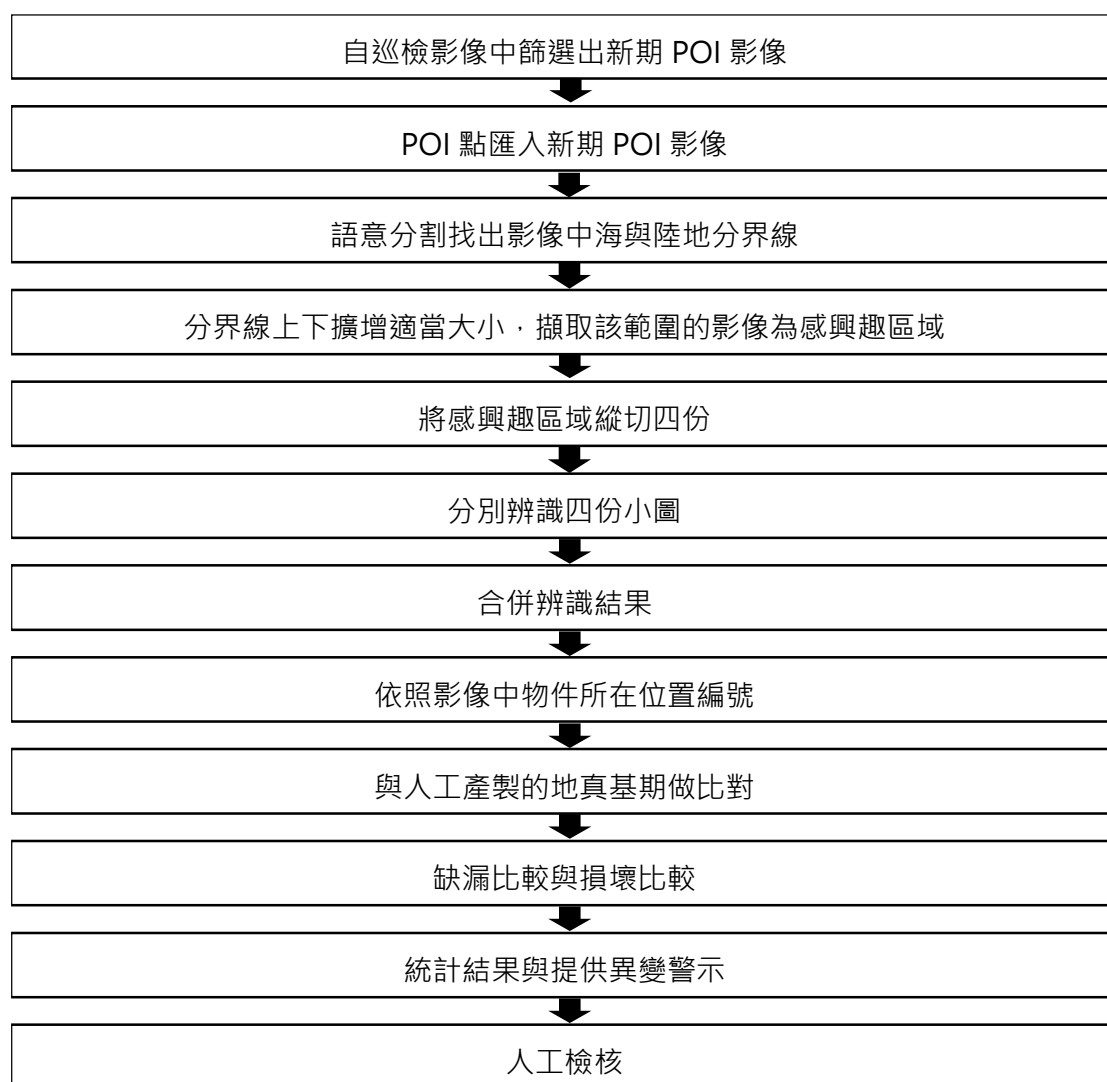


圖 6.7 以單張 POI 影像為例之岸邊設施自動化辨識分析流程



圖 6.8 異變警示範例。藍點為碰墊缺失；綠點為碰墊損壞；黃點為車檔缺失；橘點為車檔損壞；紫點為反光版缺漏

6.5.1 語意分割

本計畫將所蒐集的岸邊UAV影像標註為海、陸地與船（如圖 6.9）供後續語意分割模型訓練使用。本計畫標註共270張岸邊UAV影像作為資料集，並將資料及切分為210張訓練影像、60張驗證影像。使用FPN模型進行模型訓練，backbone為ResNet-101，使用交叉熵(cross entropy)作為模型的損失函數(Loss function)。訓練共執行100次(epoch)，最終得到的訓練損失(training loss)為0.4602；訓練資料集的交集除聯集得分(Intersection over Union Score, IoU Score)為0.8164；驗證資料集的training loss為0.5573，IoU Score為0.9882。從驗證資料集中可以看出語意分割的模型辨識效果優良（如圖 6.10）。

後續UAV影像欲進行岸邊設施辨識前，會先通過語意分割分出影像中的陸地、海洋與船隻，擷取陸地與海洋的交界線並將交界線的上界與下界擴增適當大小，以本計畫案的飛行高度與設施於影像中的成像大小來估算，上下各擴增200px的大小足可涵蓋所有欲辨識之岸邊設施。此擷取範圍為UAV影像中的感興趣區域（如圖 6.11），是後續會進行實例分割的輸入圖片。

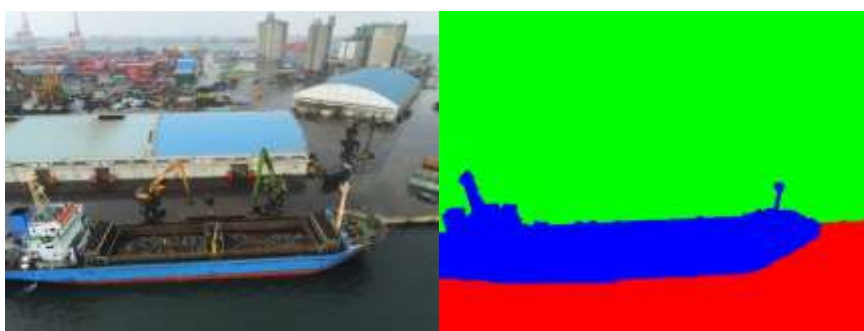


圖 6.9 岸邊影像語意分割樣本標註範例(綠色為陸地；藍色為船隻；紅色為海)

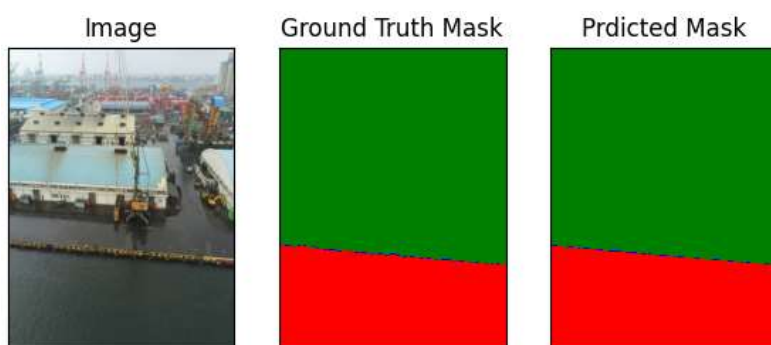


圖 6.10 岸邊影像語意分割實際預測範例。原圖（左）；地真資料（中）；預測結果（右）



圖 6.11 UAV 影像裁切後的感興趣區域範例

6.5.2 實例分割

本計畫將5.4.1中產製的感興趣區域再縱向裁切成四份小照片（如圖 6.12），用以降低後續進行Mask R-CNN訓練時電腦所需的硬體資源。將裁切後的影像中的碰墊、反光板與車檔透過多邊形描邊進行資料標註，由於不同時間拍攝的影像其曝光度、色溫、對比度略有差異，本計畫使用了不同時期所拍攝的影像來進行資料集建構，共標註204張影像作為資料集，並切分為184張訓練資料與20張驗證資料。利用Mask R-CNN進行訓練，backbone為ResNet-50-FPN，並使用Mask R-CNN訓練於coco dataset的實例分割影像的權重做為預訓練模型(Pre-train model)進行3000 epochs的訓練。最終訓練成果中如圖 6.13所示，在物件框、遮罩、分類與統整的損失上都能收斂。

在模型效能驗證上，使用驗證資料集來進行驗證，得到結果如表 6-2，Bounding Box的mean Average Precision(mAP)在IoU條件50%以上為正的條件下，可達到95.44%；在物件輪廓分割的部分，同樣在mAP@0.5的情況下，可達到95.35%。

表 6-2 岸邊設施 Mask R-CNN 辨識模型統計於驗證資料集之效能

項目	mAP@0.5	mAP@0.75
Bounding Box	95.44%	91.95%
Segmentation	95.35%	91.99%

將UAV影像實際運用模型進行偵測（圖 6.14），模型在偵測反光板與車檔時效果良好，影像中34個反光版中有30個被找到；影像中30個車檔中有25個被找到。但在偵測碰墊時的準確率不如數據的表現，影像中38個碰墊僅有19個被找到。追究其原因在於碰墊受海水遮蔽影響，因不同時期拍攝時海水潮位有所差異，即便碰墊僅部分被海水遮蔽，也會導致模型識別不出碰墊。這部分可透過增加更多時期的影像進入訓練來克服。由Mask R-CNN辨識完成後的影像會再接續進行多時期比對。



圖 6.12 感興趣區域縱切後的四份小照片範例

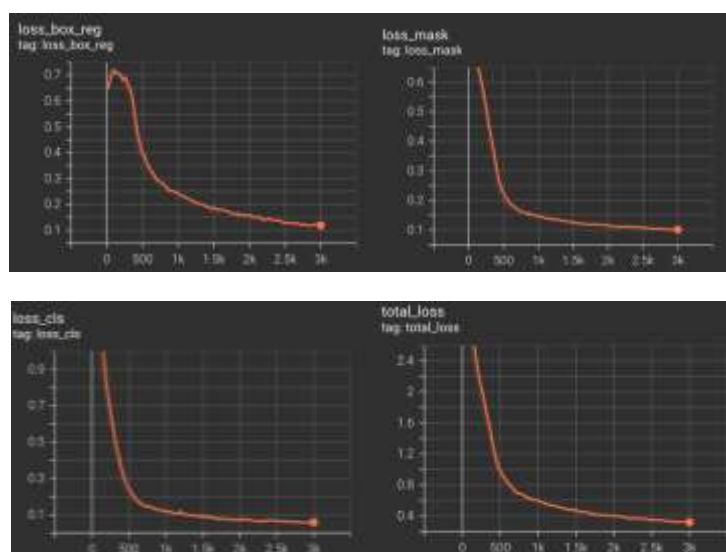


圖 6.13 岸邊設施 Mask R-CNN 辨識模型各項目的訓練損失



圖 6.14 岸邊設施 Mask R-CNN 模型辨識結果範例

可從圖中看見直立於牆面型式的碰墊辨識成功率不高，此影像中全部20個直立行碰墊只有5個有被成功辨識。

6.5.3 設施多時期比對

影像完成實例分割後，接續進行多時期比對。比對基準為人工標註之基期影像（如圖 6.15），由於新期影像與基期影像之間雖然經過POI匹配與粗略的視角轉換，彼此之間依然存在些微的拍攝範圍不一致與視角偏差，為達到影像坐標完全對位以進行多時期比對，新期的感興趣區域會先與基期影像的感興趣區域進行特徵點匹配（如圖），並利用特徵點計算兩者的投影轉換矩陣，透過投影轉換矩陣將新期影像坐標完全對位置基期影像。

對位完成後，進行缺漏比對，以基期影像所標註之各物件類別的物件框中心點為基點，搜尋新期影像再經過投影轉換對位後是否有同樣位於基點附近50px範圍內的同類別物件，若沒有則該物件標示為缺漏；反之則標記為尚存。所有尚存的物件再計算其新期偵測結果的物件遮罩含量並與基期的物件遮罩含量做比對，若 $\frac{\text{新期遮罩含量}}{\text{基期遮罩含量}} < 50\%$ ，代表新期中物體的含量減少了一半，標註為損壞物件。比對結果如圖 6.15所示。

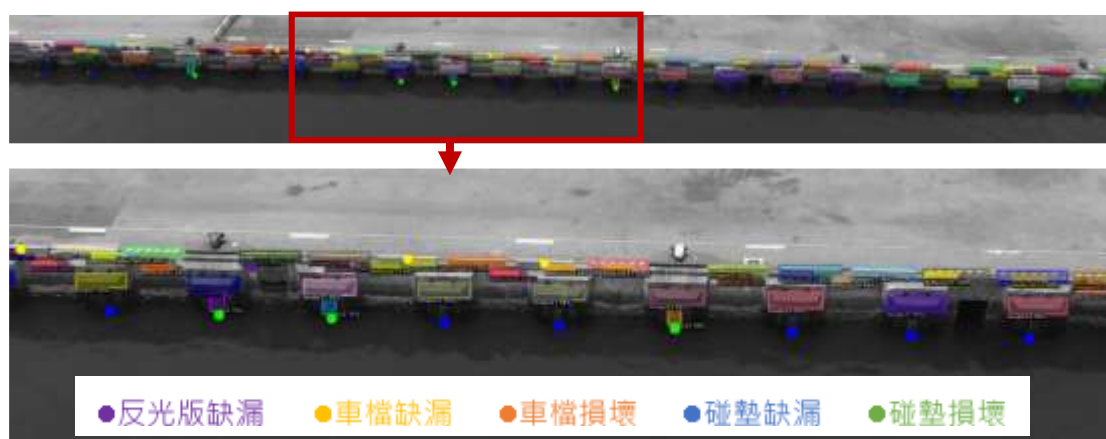


圖 6.15 多時期比對結果範例（上）與其局部放大圖（下）

統計多時期比對之結果如表 6-3至表 6-5，搭配圖 6.15的比對結果圖，人工檢核有標註為異變之物件。標註為缺漏的各目標物上，反光版缺漏五個中有一個為新期拍攝範圍之外，其餘四個為模型漏判，實際並無缺漏；碰墊受海水遮蔽影響，實際並無缺漏；車檔四個為模型漏判，實際並無缺漏。標註為損壞的各目標物上，碰墊五個接受海水遮蔽，實際並無損壞，車檔因恰好位於影像邊界，實際並無損壞。

表 6-3 無損壞的各目標物數

期數	無損壞的各目標物數			
	碰墊	反光板	車檔	總數
基期	38	35	30	103
新期	19	30	25	74

表 6-4 缺漏的各目標物數

期數	缺漏的各目標物數			
	碰墊	反光板	車檔	總數
基期				
新期	14	5	4	23

表 6-5 損壞的各目標物數

期數	損壞的各目標物數			
	碰墊	反光板	車檔	總數
基期				
新期	5	0	1	6

6.6 北堤路設施自動化辨識流程

6.6.1 物點核算方法

(1) 坐標轉換

本計畫利用上個年度所拍攝的北堤路正攝圖來得到每一個物件的坐標，再利用本年度所拍到的UAV影像利用其GPS坐標，相對高度及相機角度，並使用式(19)及式(20)來將影像坐標換算成世界坐標：

$$X - X_L = (Z - Z_L) \frac{a_1x + a_2y - a_3y}{c_1x + c_2y - c_3f} \quad (19)$$

$$Y - Y_L = (Z - Z_L) \frac{b_1x + b_2y - b_3y}{c_1x + c_2y - c_3f} \quad (20)$$

坐標轉換公式中，(x, y)為圖片的坐標點；(X, Y, Z)為世界坐標；(X_L, Y_L, Z_L)為無人機坐標；f為相機焦距；(x₀, y₀)為相機相主點；a_n~c_n為旋轉係數。

(2) 誤差分析

因為GPS有大約正負五公尺的誤差，因此算出來的物點坐標跟正射圖上的坐標會有少許誤差，為了算出誤差量，本計畫採取的方法為先取某個物件的正射圖坐標作為基準點，再找出每張UAV圖像中含有該物件的坐標點去一一比較，結果發現小物件如人孔蓋，大部分的誤差都在5公尺上下，最大不會超過10公尺，而大物件如路燈或紅綠燈因為其體積較大較難準確判定坐標，其誤差大約都在10公尺上下，最大至15公尺。

6.6.2 北堤路設施辨識成果

北堤路欲辨識之設施有路燈、紅綠燈與人手孔蓋。本計畫以Yolov5進行此三項設施的自動偵測。以物件框標註北堤路拍攝之UAV影像中的設施作為訓練資料，路燈由於燈桿的成像受拍攝時透視變形影響成像較不固定，因此另外多選擇燈頭與燈座作為標註資料。模型一共標註119張影像，將之切分為83張訓練資料、23張驗證

資料與13張測試資料。並透過旋轉、曝光與左右反轉三種資料擴增將訓練資料擴增為249張。進行150次的訓練後得到模型結果如圖 6.16，mAP@0.5可到0.944，足見模型效能良好。另一模型效能指標為混淆矩陣，如圖 6.17所示。

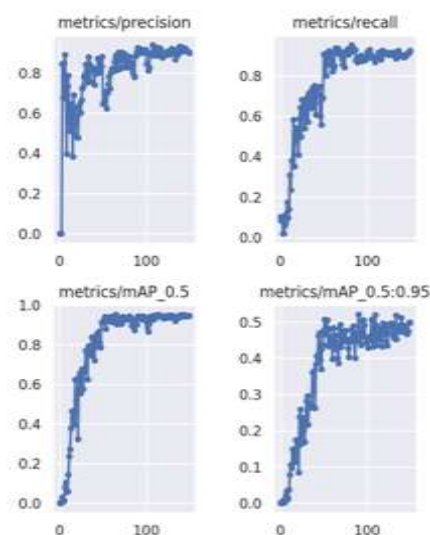


圖 6.16 北堤路設施偵測 Yolov5 模型表現。準確率（左上）；召回率（右上）mAP@0.5（左下）；mAP@0.5:0.95（右下）

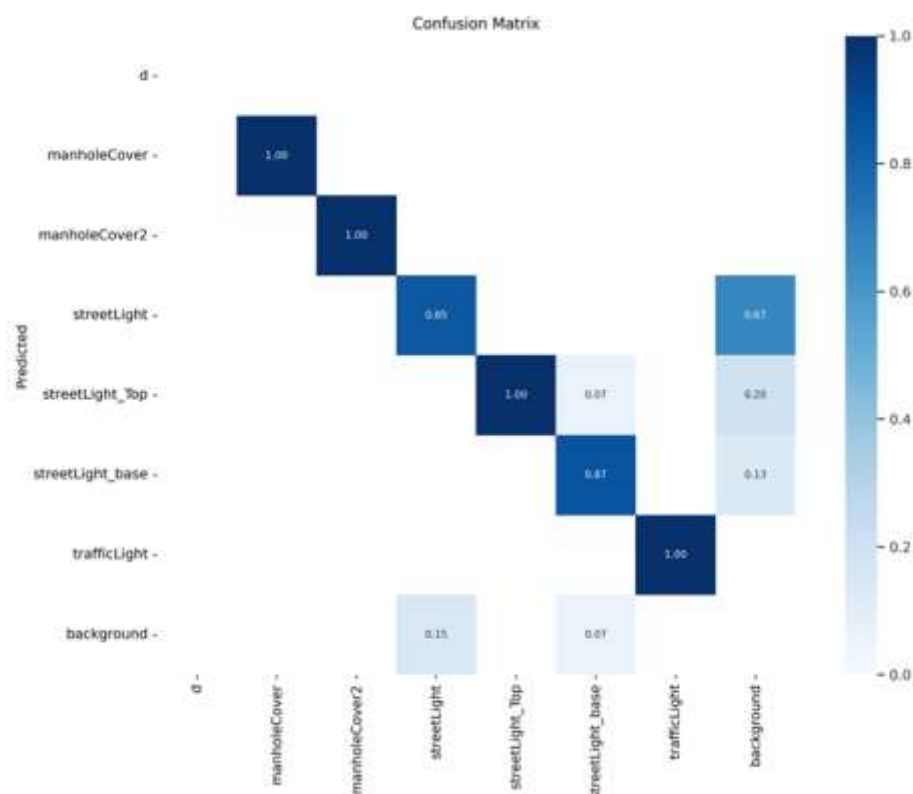


圖 6.17 北堤路設施偵測 Yolov5 模型混淆矩陣

圖 6.18為北堤路的物件辨識成果，顏色代表各物件的種類，下面數字代表最大的誤差，單位為公尺，可以看到紅色與粉紅色兩種人孔蓋的誤差大約都在5公尺上下，僅右下方有一個到9公尺，紅綠燈因為體積關係誤差來到15公尺，而路燈限於數量關係，圖 6.18僅列出一座，其他都約在10公尺上下，而最後辨識數量成果如表 6-6所示，皆與人工計算的量相同。

表 6-6 北堤路設施辨識成果

物件	數量	人工計算量
第一類人孔蓋（紅）	6	6
第二類人孔蓋（粉紅）	3	3
路燈（橘）	38	38
紅綠燈（黃）	1	1



圖 6.18 北堤路物件辨識成果

6.7 北堤路路況自動化辨識流程

6.7.1 道路標線辨識

道路標線透過Mask R-CNN進行辨識，以多邊形框選北堤路UAV影像中道路標線的部分，由於道路標線屬於狹長形物件，若影像取像方向與道路方向不垂直，標線於影像上的成像會成斜線，此情況下Mask R-CNN難以偵測出良好的物件遮罩（如圖 6.19），推測其原因為物件框涵蓋範圍太大，但真正屬於物件的遮罩部分太小。為解決此情況，本計畫將北堤路UAV影像縱向等分為5份，重新標註與訓練（如圖 6.20），減緩道路標線在影像上的跨幅，降低斜長直線發生的機率。

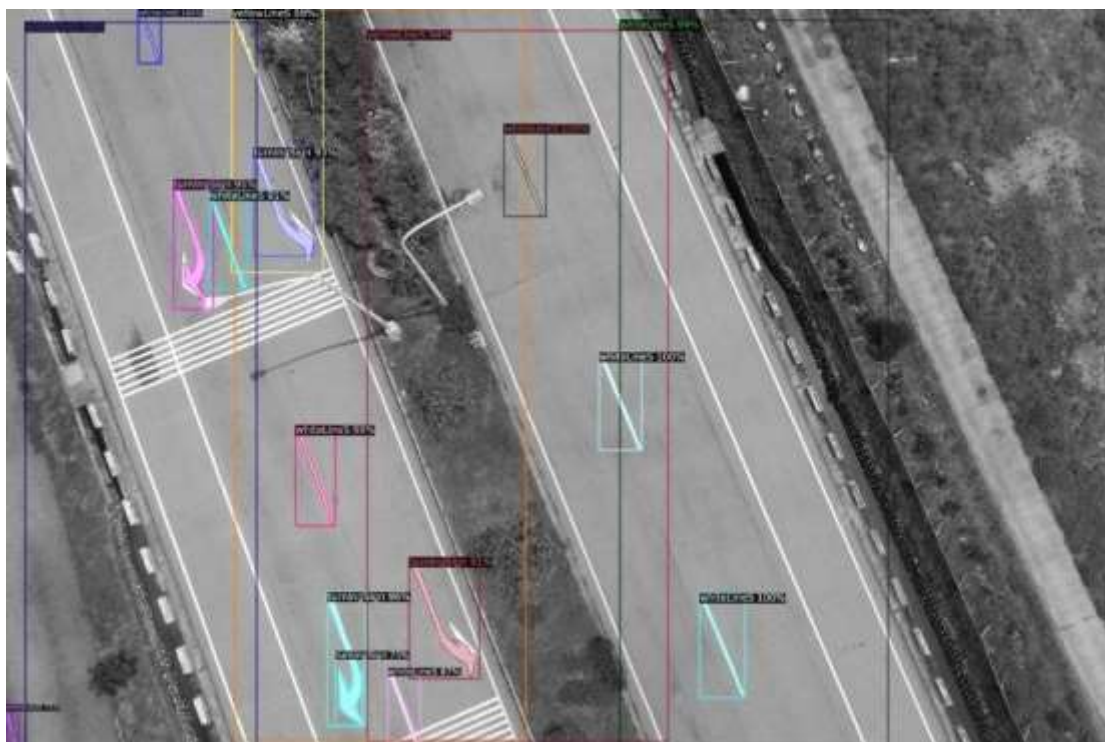


圖 6.19 Mask R-CNN 難以有效偵測斜長形物件的物件輪廓，可見圖中左邊藍色方框或右邊綠色方框



圖 6.20 減少道路標線跨幅後之影像，標註範例

一共標註385張訓練影像與110張驗證影像進行2000次訓練，模型訓練損失如圖 6.21，各項目損失值都能收斂，偵測結果如圖 6.22。而在各項目的mAP@0.5上，結果如表 6-7所示，約有七成的辨識成功率與分割成功率，較差的分割項目為單黃線，其原因在於單黃線多設立於中央分隔島左右兩側，易受分隔島中間的路樹遮蔽。

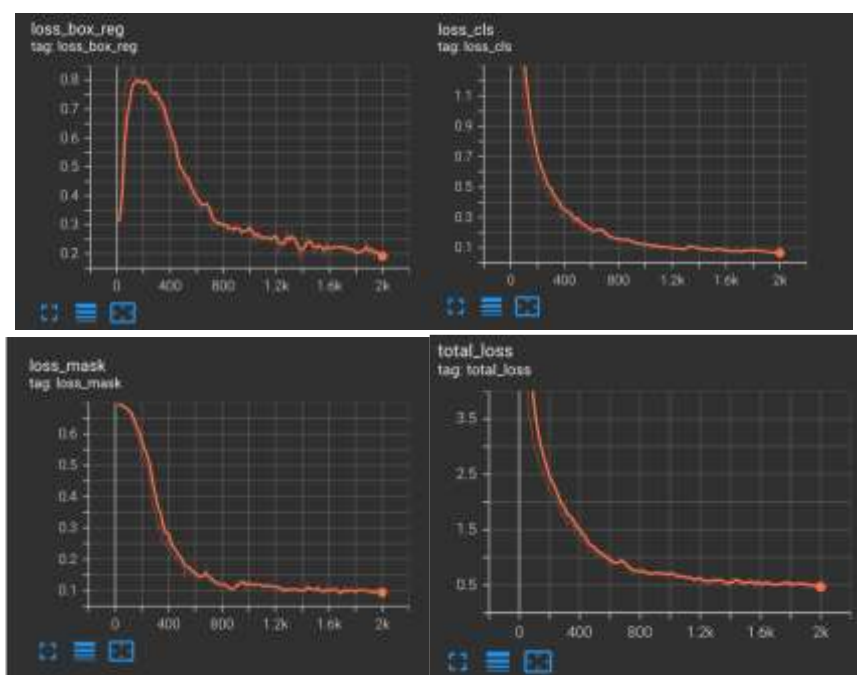


圖 6.21 北堤路道路標線 Mask R-CNN 模型各項目損失

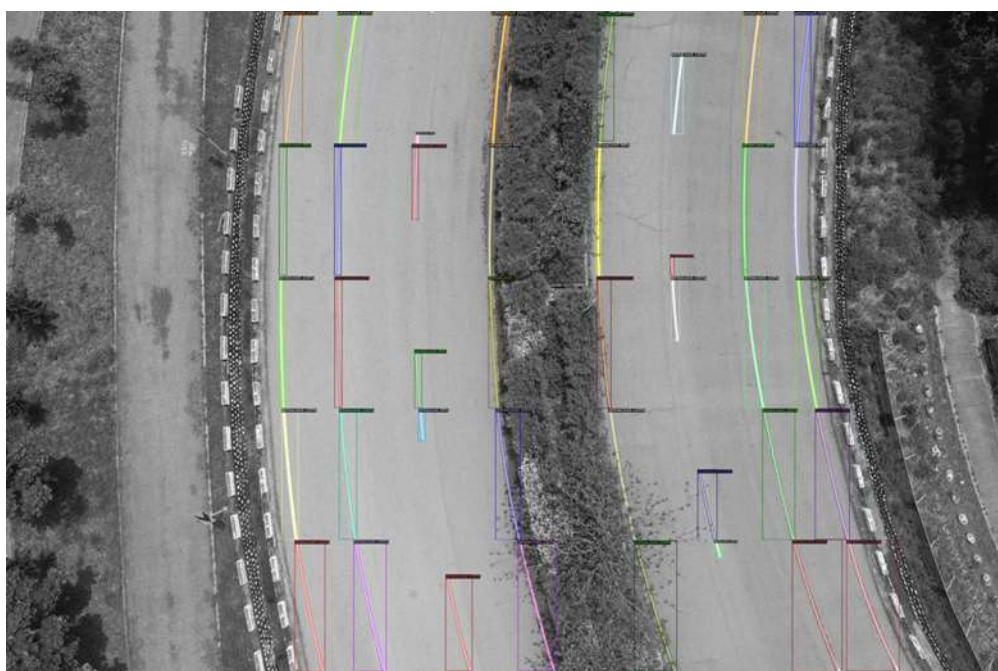


圖 6.22 北堤路道路標線 Mask R-CNN 模型偵測結果且合併成原圖

表 6-7 北堤路道路標線 Mask R-CNN 模型各目標 mAP@0.5

物件	Bbox – mAP@0.5	Seg – mAP@0.5
單白線	79.727	63.457
雙白線	83.754	81.124
單黃線	68.649	43.738

6.7.2 路面分割

(1) 資料集

由2022/04/14在北堤路拍的照片來當作訓練資料，共119張，將四張挑出當作測試集，並將剩下的115張以訓練集:驗證集=9:1 (103:12)來分。

(2) 模型與表現

該任務的模型一樣使用U-net，並使用intersection over union (IoU)來評估模型表現，如圖 6.23所示，因為任務簡單training loss與validation loss在第五次迭代就降到低於0.2，最後的IoU如表一所示，背景的IoU達0.936，前景也就是裂縫的IoU達0.943，平均為0.94，且如圖四及圖五所示，模型已能將路面位置分割出來。

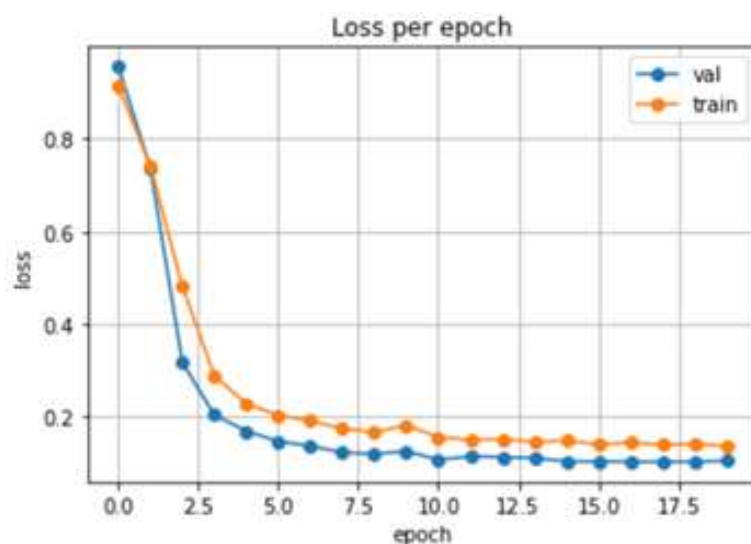


圖 6.23 路面分割學習曲線

表 6-8 模型在測試集上的表現

IoU in test dataset		
Background IoU	Foreground IoU	Mean IoU
0.936	0.943	0.94

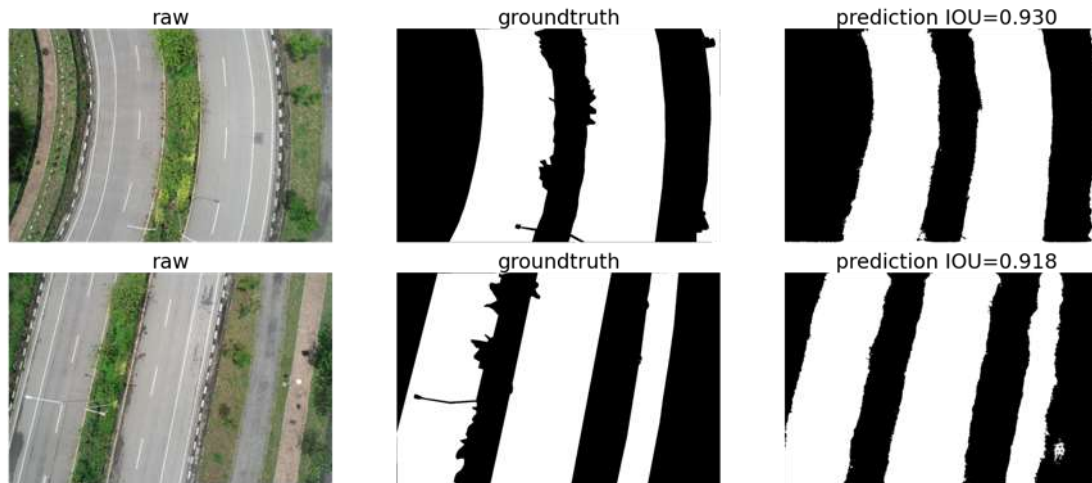


圖 6.24 路面分割成果

6.7.3 路面坑洞辨識

(1) 資料集

由2022/06/21在南堤路拍的照片來當作訓練資料，本計畫將所有照片切成多張912*912 的小照片，並挑出其中含有坑洞的部分，共125張，並按照以下比例區分資料集，訓練集:驗證集:測試集=8 : 1 : 1 (99 : 13 : 13)。

(2) 模型與表現

該任務的模型一樣使用U-net，並使用intersection over union (IoU) 來評估模型表現，如圖 6.25所示，training loss與validation loss都有逐漸下降，代表模型有在成功進步，最後的IoU如表 6-9所示，背景的IoU達0.999，前景也就是裂縫的IoU達0.777，平均為0.888，此外如圖 6.26所示，模型已能成功找出坑洞位置並將其輪廓大致分割出來，且圖 6.27路面上的一些不規則補丁也不會有誤判的情形發生。

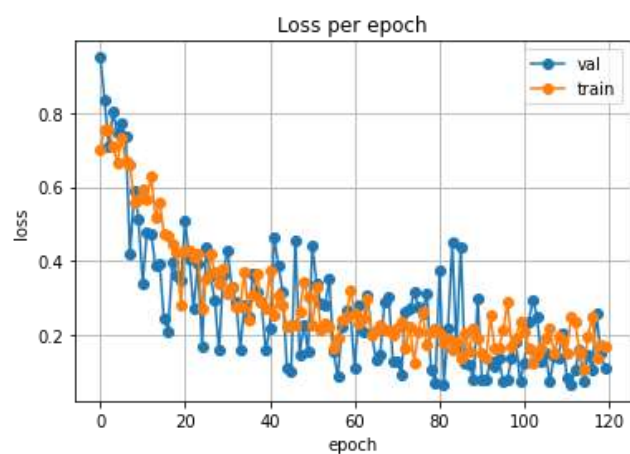


圖 6.25 學習曲線

表 6-9 模型在測試集上的表現

IoU in test dataset		
Background IoU	Foreground IoU	Mean IoU
0.999	0.777	0.888

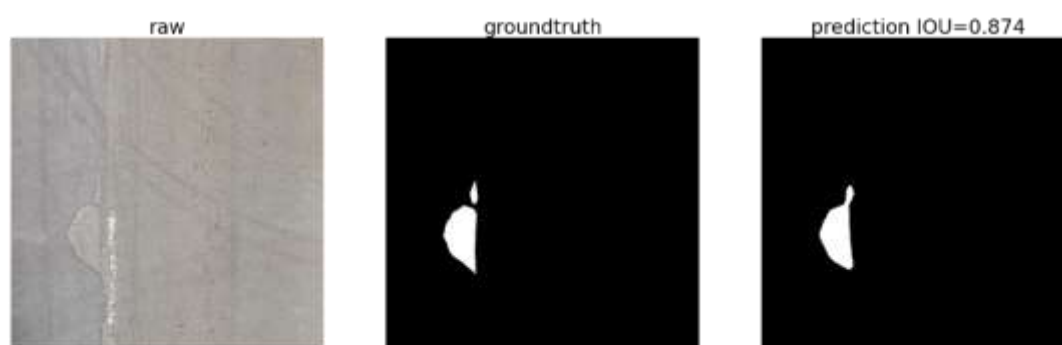


圖 6.26 路面辨識成果

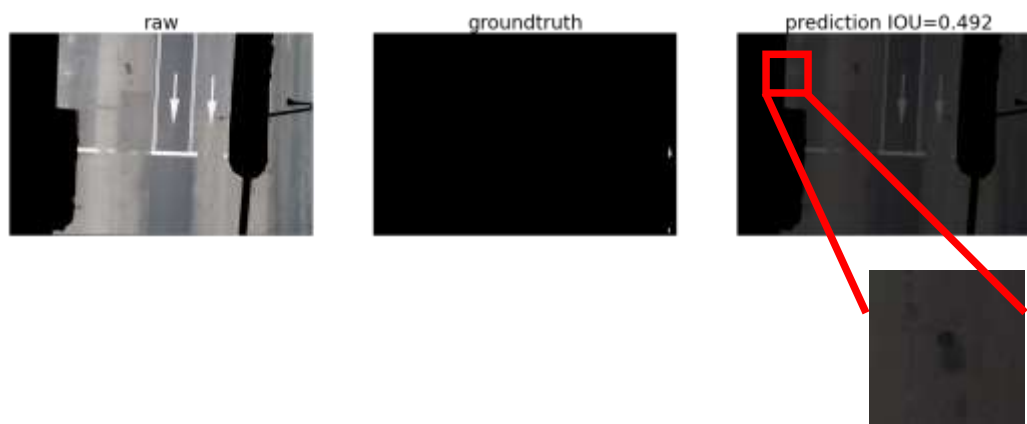


圖 6.27 路面辨識成果於僅含路面之原圖

6.7.4 裂縫偵測方法

(1) 資料集

因為港區的資料不多，因此本計畫找了網路上路面的資料集來做轉移學習，而該資料集是在巴西的Espírito Santo, Rio Grande do Sul and the Federal District所拍攝的，內容如圖 6.28，共有2235張照片，其中1896個當做訓練集，335個當做驗證集。



圖 6.28 資料集圖片與 groundtruth

此外使用2022/04/14在北堤路拍的照片來當做本地資料集，一共人工標記了21張照片，如圖 6.29，並將每張照片分割成70張500*500的小照片，因此總共有1470張照片來做訓練，其中1282張當做訓練集，143張當做驗證集，45張當做測試集。



圖 6.29 本地資料集圖片與 groundtruth

(2) 模型與表現

該任務的模型一樣是用U-net，並一樣使用IOU來評估模型表現，如圖 6.30所示，training loss與validation loss都有逐漸下降，代表模型有在成功進步。表 6-10為預訓練模型與最終成果的比較，可以看到

Mean IoU上升了32%，表示加入了本地資料使模型表現上升，成果如圖 6.31所示。又如表 6-11所示，在原圖較多雜訊的情況下，Mean IoU下降約8%，表示這些雜訊會影響模型表現，但如圖 6.32所示，模型已經能將裂縫的位置給分割出來，已具一定參考性。且若從還未加入本地資料的預訓練模型預測模式來看，可以發現該模型預測的依據似乎是路面顏色較深的水漬而非裂縫，相較之下經過本地資料訓練的模型則不受水漬影響。

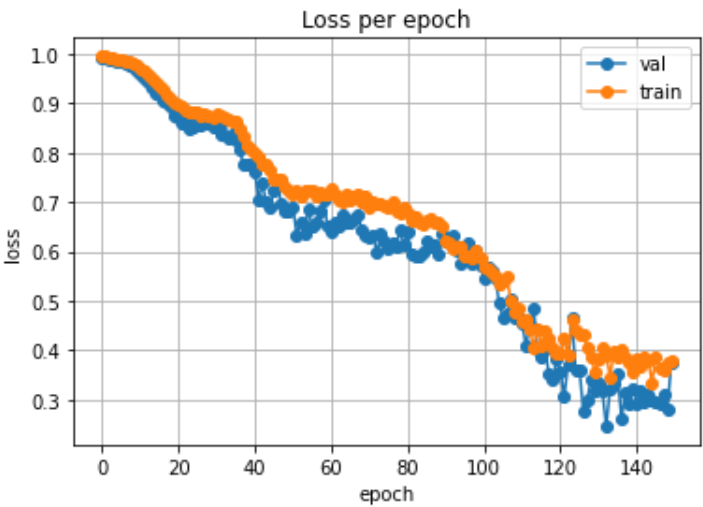


圖 6.30 學習曲線

表 6-10 模型在測試集上有無本地資料的表現比較

IoU in test dataset			
dataset	Background IoU	Foreground IoU	Mean IoU
Pretrain data	0.997	0.062	0.53
With local data	0.997	0.416	0.707

表 6-11 模型在原圖的表現

IoU in test dataset		
Background IoU	Foreground IoU	Mean IoU
0.996	0.3	0.648

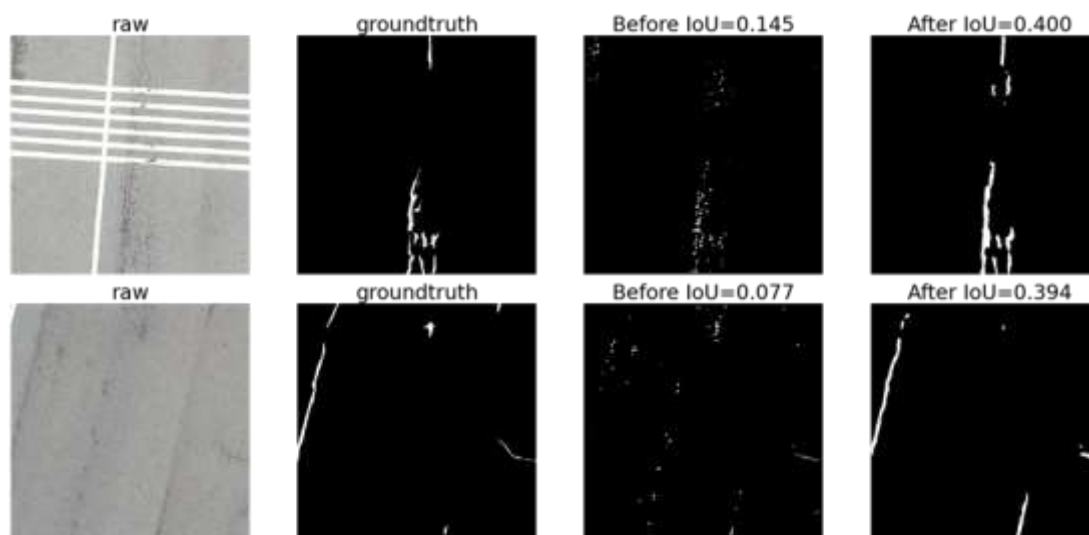


圖 6.31 新增本地資料之路面辨識成果

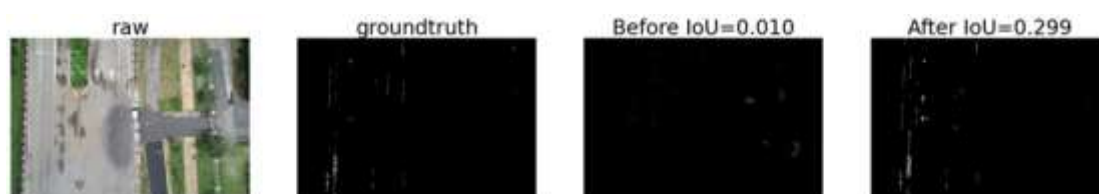


圖 6.32 路面辨識成果於路面之原圖

6.8 本章小結

在岸邊設施的偵測上，透過語意分割找出感興趣區域，僅將感興趣區域進行實例分割，減少UAV影像中不必要的資訊後，能有效提升辨識成果，達到九成多的辨識精確度，惟碰墊受海水遮蔽影響，每次於影像中的成像變化較大，辨識效果僅五成多，辨識後可透過UAV影像的座標資訊對位POI照片，在透過投影轉換將影像完全對位比對不同時期設施間的異變情況。

碰墊辨識效果不佳可透過新增更多受不同潮位線遮蔽的碰墊樣本來克服。另外在碰墊的多時期的比對上，可透過判斷碰墊位置是否處在語意分割中的海水區域來判斷模型的漏判是否是因為受海水遮蔽影響，提供進一步的資訊給檢視人員。

在道路設施與道路標線的辨識上，透過物件偵測可以找出道路上路燈、紅綠燈與人手孔蓋的位置，雖然模型的辨識效能僅有八成左右的準確度，但由於UAV拍攝時是連續拍攝，透過物點核算，即

便單一照片沒有辨識出設施，但連續照片中只要有一張照片有成功辨識即可算為被模型偵測到，因此整條北堤路上的設施都能被有效偵測出來。道路標線透過切分照片能有效的偵測出整條路上的標線位置與輪廓，透過輪廓可統計整條北堤路上標線的缺損情況，提供是否需要進行道路維護明確的量化指標。

坑洞辨識的部分現在Mean IoU可達0.888，但因為資料量太少的關係，測試集裡面的坑洞有些跟訓練集裡面的相同，則模型表現可能會有高估的情形，未來可能需要增加坑洞的資料來強化模型表現。

至於裂縫的部分目前模型已可將裂縫的位置及大小大略標出來，在裂縫寬度評估方面已具參考價值。但未來若要改善高估寬度的情形，可能需要提升標注資料品質，現有因為時間以及樣本有限，導致目前的模型未達完善，若未來能將資料品質提升，將可進一步提升模型表現。

第七章 道路破損評分

本計畫所使用的評分方式是參考內政部營建署市區道路管理維護與技術規範手冊研究【柔性鋪面損壞調查手冊】的方式，原先的評分項目分為13項：1.龜裂 2.縱向及橫向裂縫3.塊狀裂縫4.坑洞及人孔高差與薄層剝離5.車轍6.補綻及管線回填 7.推擠8.隆起與凹陷9.冒油10.波浪狀路面11.車道與路肩分離12.滑溜裂縫13.骨材剝落，本計畫將重點放在裂縫及坑洞兩項，而北堤路並無坑洞，因此僅以裂縫的部分來做計算。

7.1 裂縫分級定義

評分方式將裂縫依嚴重程度分為三級：

(1) 輕級

裂縫型態呈細小毛髮狀，且裂縫沒有破裂現象，裂縫可填補但不可有滲水情況，無填補之裂縫平均寬度須小於0.3 公分以下，不會導致車輛有明顯跳動現象，如圖 7.1：

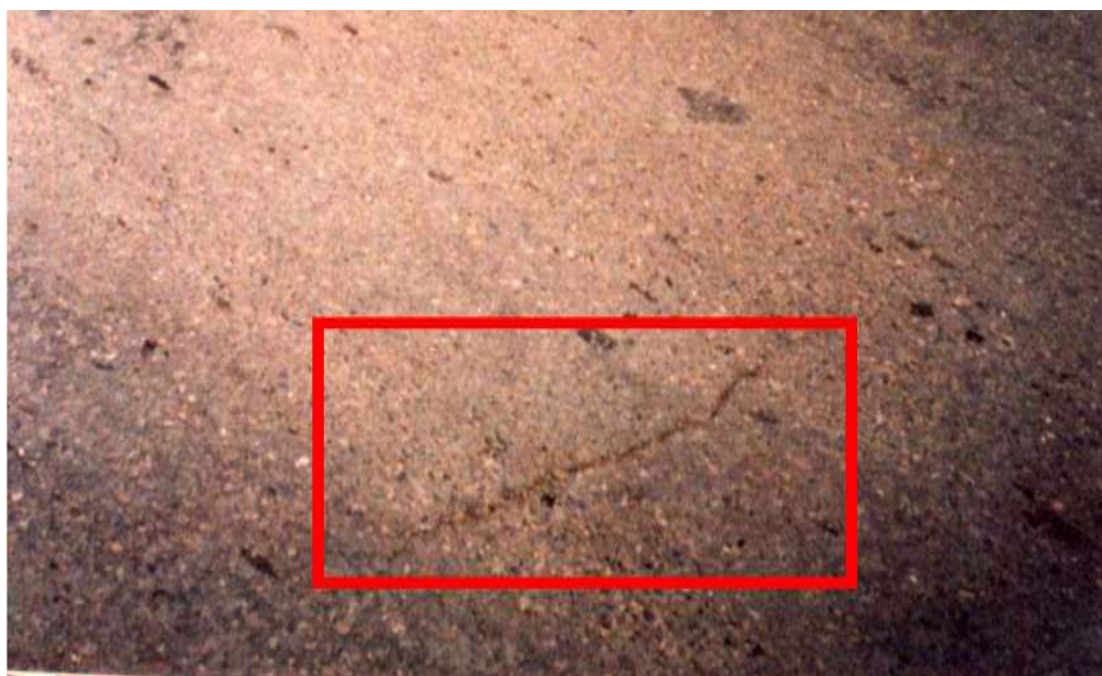


圖 7.1 輕級裂縫

(2) 中級

裂縫有輕微破裂現象，且裂縫周圍或相交處有其他細小、不規則裂縫出現。有填補之裂縫會有滲水情況，無填補之裂縫平均寬度須介於 0.3 公分至 0.5 公分，導致車輛有較明顯跳動現象，如圖 7.2：



圖 7.2 中級裂縫

(3) 重級

裂縫有嚴重破裂現象，且裂縫周圍或相交處有其他中級至重級嚴重程度之不規則裂縫出現。已填補之裂縫有滲水情況，無填補之裂縫平均寬度會大於0.5 公分，導致車輛有較劇烈跳動現象，如圖 7.3：



圖 7.3 重級裂縫

7.2 PCI 計算流程

欲計算PCI需要透過裂縫密度的結果求取各自級數，從而找到折減值進行修正作業，最終根據PCI等級對照表得出鋪面優劣結果，而整體計算流程如圖 7.4所示，以下將針對各步驟加以說明。



圖 7.4 裂縫密度計算流程圖

首先，將原圖放入訓練模型並截出待計算之區域並將所有裂縫進行7.2.2節的骨架化，並如步驟5所示，將每條裂縫每0.2m量一次寬度，並將所有得到的寬度用7.1.的標準分級。又因每個寬度都代表一個0.2m的裂縫，所以將各級裂縫的數量乘0.2m即可獲得總長。接著將總長除以估算區域面積，得到各級裂縫密度，此時將各級裂縫密度分別帶入各自級數的公式(式(21)至式(23))，得到各自的折減值d。

$$\text{輕級} \quad d = -1.7 + 4.45 \log x + 5.18 (\log x)^2 \quad (21)$$

$$\text{中級} \quad d = 2.1 + 11.51 \log x + 4.93 (\log x)^2 \quad (22)$$

$$\text{重級} \quad d = 8.3 + 14.06 \log x + 12.96 (\log x)^2 \quad (23)$$

d代表折減值，x代表裂縫密度

計算最大容許損壞折減值數量 m 值，計算公式如式(24):

$$m = 1 + \left(\frac{9}{98} \right) (100 - HDV) \leq 10 \quad (24)$$

HDV=最大折減值

以m值做為填入表 7-2之資料量，若原有之折減值數量不到m個，則選取全部資料量，但最多只能選取 10 個折減值做為依據。在表 7-1範例當中，其 $m = 1 + (9/98)(100 - 20) = 8.3$ ，m值採整數且小數部份一

律進位故本例選取8個折減值做為運算根據，但實際中只有3個折減值，故全部採用。

表 7-1 折減值計算表

折減值計算表		
損壞類型及嚴重程度	密度（%）	折減值
輕級	5	3.9
中級	12	20.3
重級	2	13.7

依據表 7-1的損壞型式折減值，由大至小之順序填入表 7-2中第一列內，並將折減值橫向加總後，填入表二的第一列的 Total 欄內。本例之 Total 為 38。

計算出取樣單位大於2折減值之個數，填入表 7-2的第一列的q值欄內。本例開始之 q 值為3，依據 q 值及總折減值，按修正折減值公式(式(25)至式(31))將total帶入x找出修正折減值(CDV)，填入表 7-2的第一列的 CDV 欄內。本例之 CDV 值為 23。

$$\text{if } q=1 \quad \quad \quad CDV = x \quad \quad \quad (25)$$

$$\text{if } q=2 \quad \quad \quad CDV = -3.6 + 0.91x - 0.0017x^2 \quad \quad \quad (26)$$

$$\text{if } q=3 \quad \quad \quad CDV = -6.4 + 0.82x - 0.0013x^2 \quad \quad \quad (27)$$

$$\text{if } q=4 \quad \quad \quad CDV = -13 + 0.86x - 0.0015x^2 \quad \quad \quad (28)$$

$$\text{if } q=5 \quad \quad \quad CDV = -12 + 0.76x - 0.0011x^2 \quad \quad \quad (29)$$

$$\text{if } q=6 \quad \quad \quad CDV = -14.7 + 0.75x - 0.0011x^2 \quad \quad \quad (30)$$

$$\text{if } q=7 \quad \quad \quad CDV = -18.5 + 0.86x - 0.0018x^2 \quad \quad \quad (31)$$

進行第二次計算柔性鋪面之CDV，仍將第一列之損壞型式折減值抄錄至第二列，僅將最末一項大於2之損壞型式折減值以2代替 (本例之最後一項原為 4，於第二列中以2代替之)，然後將所有第二列折減值加總後，填入表 7-2的第二列的Total欄內，再以公式算出對應之

CDV。

再依據9至10等步驟，依序算出q值及修正折減值，填入表 7-2的第二列的第三及四列，直至q=1時為止。

表 7-2 修正折減值計算表

修正折減值計算表						
#	折減值			Total	q	CDV
1	20	14	4	38	3	23
2	20	14	2	36	2	27
3	20	2	2	24	1	24

當取樣單位之q=1時為完成修正折減值計算作業。由表 7-2中CDV欄內取其最大值(本例為27)，本例之 PCI 值即為 $(100-27=73)$ 。照表 7-3標準來看，其鋪面狀況等級為「很好」。

表 7-3 PCI 等級對照表

PCI值	等級(Rating)
85~100	最佳(Excellent)
70~85	很好(Very good)
55~70	好(Good)
40~55	尚可(Fair)
25~40	差(Poor)
10~25	很差(Very poor)
0~10	不合格(Failed)

7.2.1 骨幹化(Skeletonize)

本計畫是參考Zhang and Suen (1984)所發表之論文內所使用的方式來進行骨架化，骨架化的目的是將裂縫的走向找出來，如此才能找出法向量並算出寬度，流程如下：

1. 將圖片轉換成二值圖，以圖 7.5為例，符號@代表1，而符號.代表0。

2. 將圖中1的部分由最外層一層一層的轉換成0，直到留下來的部分滿足以下條件：

- 寬度只有一個像素寬，並為骨架的端點。
- 該像素兩端都是骨架，為骨架的中點。

用預裂縫上的成果則如圖 7.6所示。

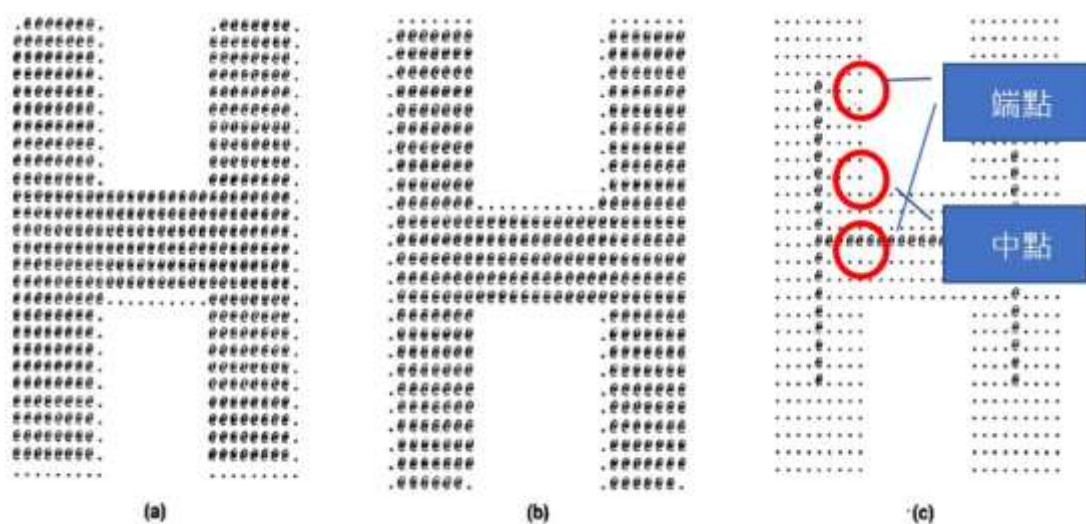


圖 7.5 圖解骨幹化



圖 7.6 骨幹化成果(紅色為放大的裂縫，綠色為骨架)

7.2.2 裂縫寬度量化流程

本計畫是參考骨架正交法(Sun et al., 2021) 來評估裂縫的寬度，以圖 7.7為例，流程如下：

1. 利用骨架化(詳見6.6.5) 的方式求得裂縫中線
2. 用SVD (Klema and Laub, 1980) 算出中線上某個點的法線（藍線y軸）
3. 將裂縫輪廓線上最接近法線的兩個點連線並找出與法線的交點（紅點）
4. 於另一邊重複步驟三，並將兩交點連起來，連線長度即為該點寬度。

在每條裂縫上每20公分量一次長度，不到20公分者則不量，最後即可算出該裂縫的最大，最小及平均寬度。

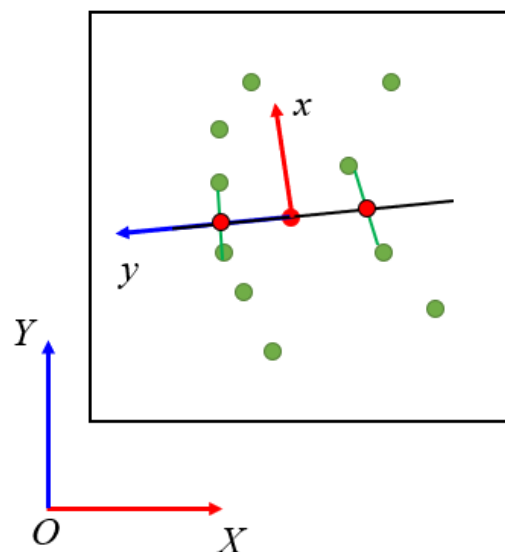


圖 7.7 圖解骨架正交法

因本計畫在標記裂縫地真資料(groundtruth)階段時將其標得較寬，因此訓練出來的模型會有高估裂縫大小的問題，而經過計算後發現將算出來的結果除以6才會是比較合理的數值，因此將最後的結果除以6當作折減。

7.3 路面裂縫評估成果

圖 7.8為北堤路每10公尺做一次PCI檢測的結果，使用資料是2022年9月23日在北堤路所拍攝之UAV影像，深綠代表最佳，淺綠代表很好，成果所示北邊路段約有七成的等級為很好，其餘等級為最佳，而南邊路段約有八成的等級為最佳，其餘為很好，由此可知北堤路整體的鋪面狀況是很多的，而南邊路段的路況又比北邊路段好。



圖 7.8 北堤路路況檢測成果

7.4 本章小節

PCI指標方面仍為測試階段，原訓練之兩種破損類別:裂縫及坑洞，因北堤路缺乏坑洞而僅納入裂縫進行評估，為較可惜部分，未來將納入更多破損部分，增進指標的全面性。

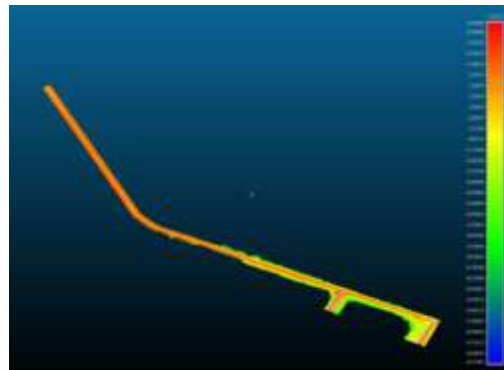
第八章 UAV影像技術之延伸應用

8.1 構造物位移監測

透過無人機進行構造物監測分析，本計畫以南堤為例，共計拍攝三個時期的南堤影像，第一期為2021/3以定翼機拍攝，航高120m空間解析度5cm。第二期為2021/6以多旋翼機拍攝，航高60m空間解析度約2公分，第三期為2021/9以多旋翼機拍攝，航高60m空間解析度約2公分。由於使用的無人機不同，解析度也有差異，為了使比對成果一致，三個時期的成果統一空間解析度為5cm。圖 8.1至圖 8.3顯示三個時期所拍攝的正射影像與三維點雲成果，再將這三個時期的成果套疊，並由圖 8.4道路中心線位置，透過高精度三維點雲拉出平面坐標與高程坐標，並比較三個時期的差異性。



(a)



(b)

圖 8.1 臺中港南堤(a)第一期正射影像(b)第一期三維點雲



(a)



(b)

圖 8.2 臺中港南堤(a)第二期正射影像(b)第二期三維點雲

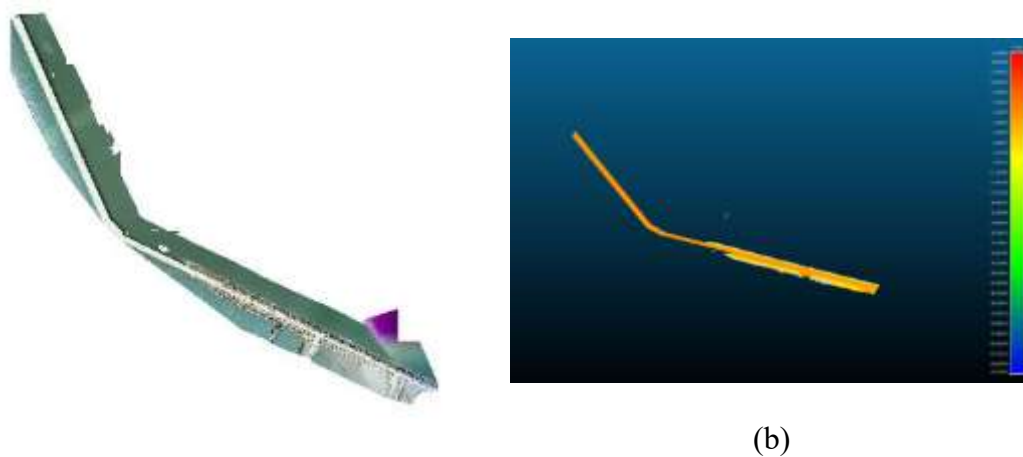


圖 8.3 臺中港南堤(a)第三期正射影像(b)第三期三維點雲



圖 8.4 臺中港南堤道路中心線位置圖

將南堤三個時期的斷面圖展示如圖 8.5，距離0m為起點表示內陸，距離1080m為終點表示外海，透過圖面得知垂直位移基本上並

無太大差異，整體呈現平緩。本計畫以第一期為基準，分析第二期與第一期差異，以及第三期與第一期差異，如圖 8.6所示，透過差值圖，能看到出現垂直變化的區域。透過表 8-1，可得知第二期與第一期整體差異為 $\pm 10.6\text{cm}$ ，第三期與第一期差異為 $\pm 14.2\text{cm}$ 。此外，透過本計畫分析三維模型的精度約為 $\pm 15.3\text{cm}$ ，高程變化小於此精度，因此可推斷變化趨勢不大。

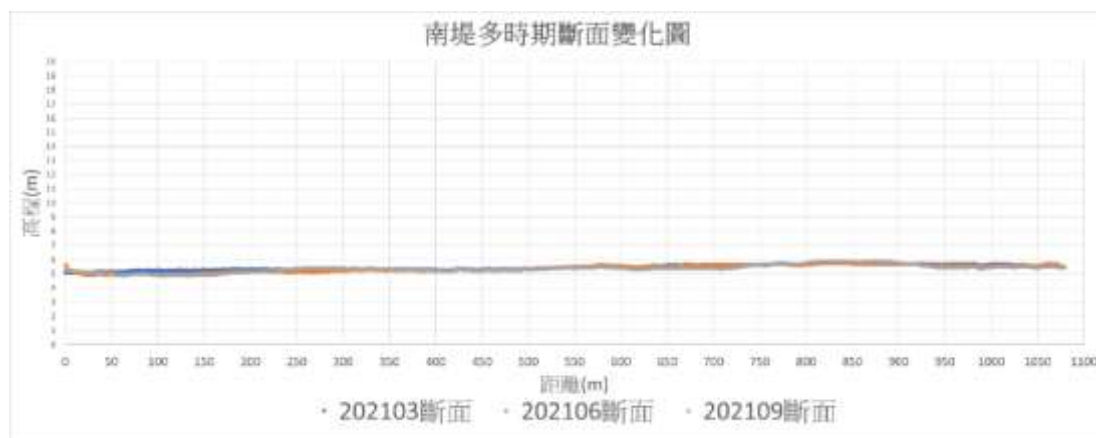


圖 8.5 臺中港南堤多時期断面

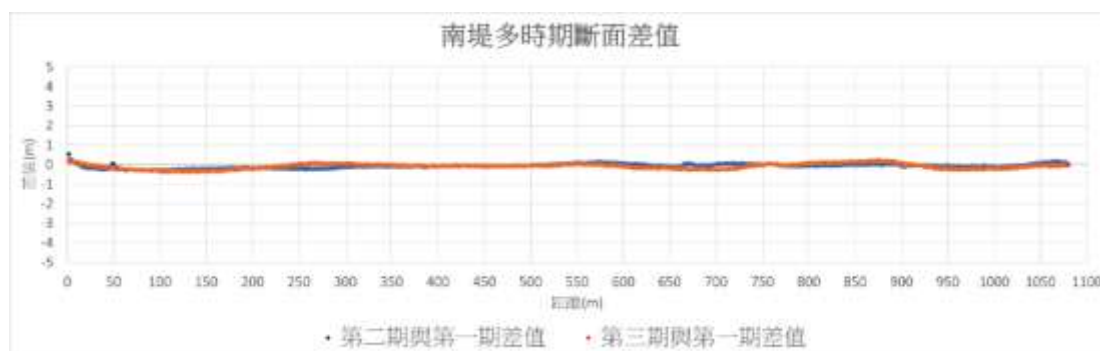


圖 8.6 臺中港南堤多時期断面差值

表 8-1 臺中港南堤不同時期垂直（高程）之均方根誤差值

時期	均方根誤差(m)
第二期與第一期垂直差異	$\pm 10.6\text{cm}$
第三期與第一期垂直差異	$\pm 14.2\text{cm}$

在水平位移的部分，同樣以第一期為基準，分析第二期與第一期差異，以及第三期與第一期差異，如圖 8.7所示，透過差值圖，能

看到出現水平位移變化的區域。透過表 8-2，可得知第二期與第一期整體差異為 $\pm 5.7\text{cm}$ ，第三期與第一期差異為 $\pm 6.7\text{cm}$ 。此外，透過本計畫分析三維模型的精度約為 $\pm 9.0\text{cm}$ ，平面變化小於此精度，因此可推斷水平位移變化趨勢非常微小。

整體而言，南堤之垂直精度與水平位移精度小於無人機影像建模之精度，因此目前可視為變動差異微小，另三個月的變化尺度較難以顯示變動量，建議若以無人機進行構造物位移分析，時程可延長至半年或一年監測一次才有顯著成果。

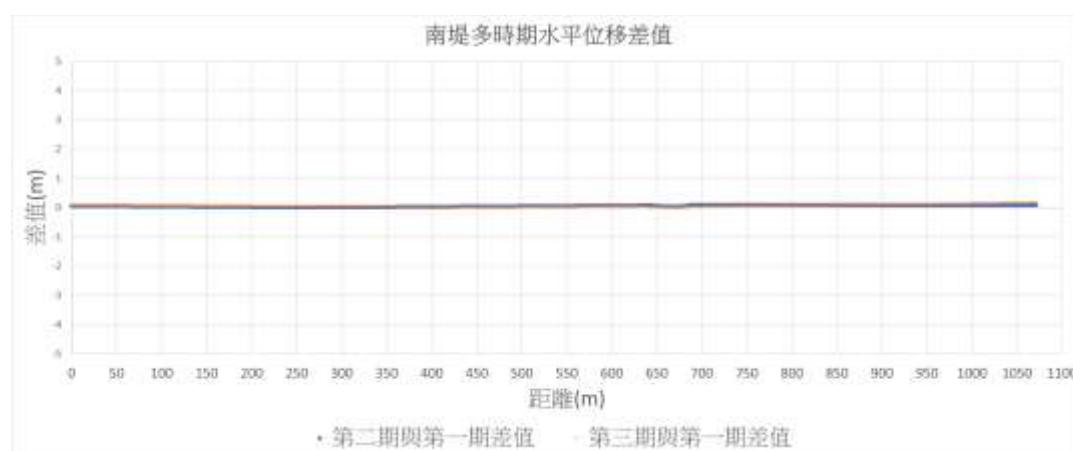


圖 8.7 南堤多時期水平位移差值

表 8-2 臺中港南堤不同時期水平位置之均方根誤差值

時期	均方根誤差(m)
第二期與第一期水平差異	$\pm 5.7\text{cm}$
第三期與第一期水平差異	$\pm 6.7\text{cm}$

8.2 光達影像分析

8.2.1 光達感測器介紹

光達感測器之特性，透過雷射掃描儀向地面發出雷射光，對地物之物體進行掃描與紀錄三維坐標，能迅速蒐集大量地表資訊。針對港區而言，適用於結構物監測例如北防砂堤、港區道路、港區建築、消波塊、港區特定地形。列舉如表 8-3 進行討論。

表 8-3 光達感測器分析適用項目

項目	分析目的
北防砂堤	分析結構垂直以及水平位移
港區道路	分析道路裂縫、破損
港區建築	分析建物外觀變化
消波塊	分析垂直以及水平位移
港區特定地形	分析地表變遷

本計畫所使用之光達感測器如圖 8.8所示，本儀器可掃描之範圍高達100公尺;資蒐集頻率為每秒30萬個點;水平視野為360度，垂直視野為30度。如圖 8.9為本計畫所選定測區，圖 8.10為光達點雲成果，主要為拍攝北防砂堤之消波塊與堤防。光達感測器用於多時期資料蒐集，比較偵測物體之位移量。故執行資料蒐集作業時，預期解析度需達到1.5公分以下，以利後續分析。故無人機建議航高為20~30公尺，能有較高之解析度，並能以點雲(圖 8.10)清楚還原物件之特徵。此外無人機飛行速度建議1~3m/s，避免港區風大而儀器過度晃動。另相關無人機飛行參數設定參閱表 8-4。



圖 8.8 Kaarta Stencil2 光達感測器



圖 8.9 北防砂堤消波塊與堤防影像

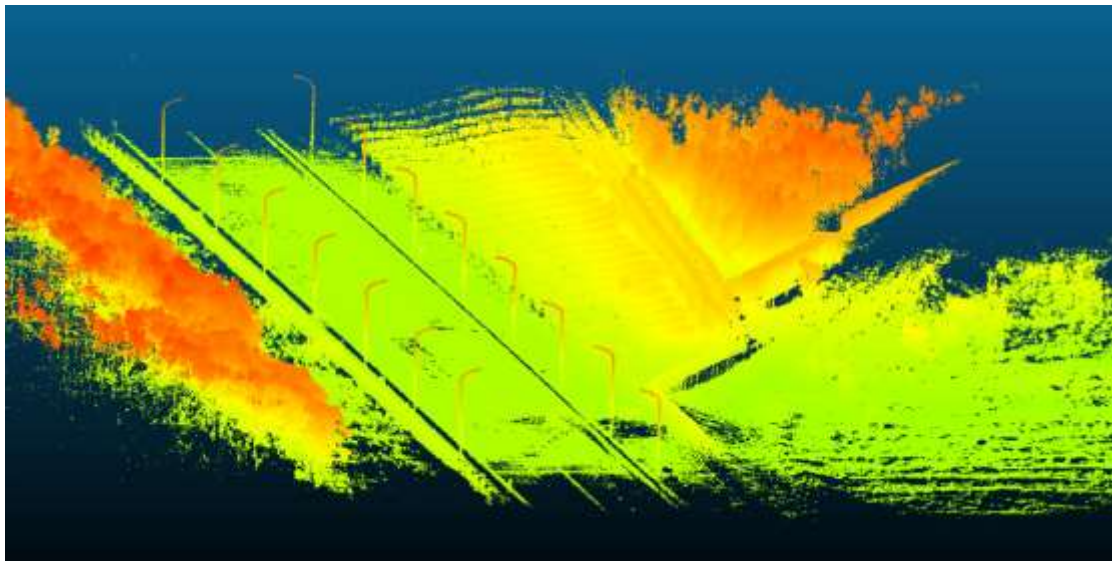


圖 8.10 北防砂堤消波塊與堤防原始三維點雲

表 8-4 無人機光達感測器飛行參數

項目	參數	備註
航高	20~30m	地面解析度約為 1.5cm
飛行速度	1~3m/s	

8.3 熱紅外影像分析

市面上常見的彩色相片，是利用三種不同顏色通道R、G、B做結合所呈現，可以即時記錄當前環境狀況。不過在特殊場景中仍會被外在因子所影響，如夜間無法使用等問題；再者，台灣位在熱帶與亞熱帶氣候地帶，一整年有許多時間處在高溫的天氣中。環境在

太陽長時間曝曬下，容易發生即時性火災等突發性意外。因此特定場域均需要有專業消防人員做定期巡檢來避免火災。但在台中港地幅龐大的區域，消防人員巡檢作業所耗費的時間長。即時性的火摘也可能短時間就引發巨大的意外，消防人員趕不及做巡檢下意外就發生。因此本年度計畫嘗試使用熱紅外影像搭載無人機做測試。

8.3.1 熱紅外感測器介紹

熱紅外感測器用於測量目標本身與背景間的紅外線差，可以得到不同的熱紅外線形成的紅外圖像。熱紅外影像被識別做為蒐集、分析溫度變化和建模的強大工具。尤其近年來被應用於無人機上，能快速大範圍的拍攝。針對港區而言，適用於結構物監測例如北防砂堤、港區防風林、港區建築、港區道路、特定物件。列舉如表 8-5 進行討論。

表 8-5 熱紅外感測器分析適用項目

項目	分析目的
北防砂堤	分析沙洲含水量
港區防風林	分析植物生長健康程度
港區建築	分析建物外觀破損程度
港區道路	分析道路裂縫、破損
特定物件 ex 煤堆	偵測煤堆溫度

本次熱紅外線影像利用AVG100MD無人機專用熱影像相機做拍攝，如圖 8.11所示，儀器之解析度為高320×寬240pixel，不僅可以監測一般環境-40~120度熱影像，更可以調整拍攝0~500度高溫情況拍攝，精準度落在±2度之間，紅外光譜為8~14μm。熱紅外感測器之FOV與解析度有限，故拍攝範圍需要遠近適中，太遠則解析度不佳，太近則影像資訊少。在本計畫的評估下，航高50公尺具有良好的解析度(23cm/pixel)及拍攝範圍，相關無人機飛行參數設定參閱表 8-6。



圖 8.11 AVG1000 主機

表 8-6 熱紅外紅外感測器飛行參數

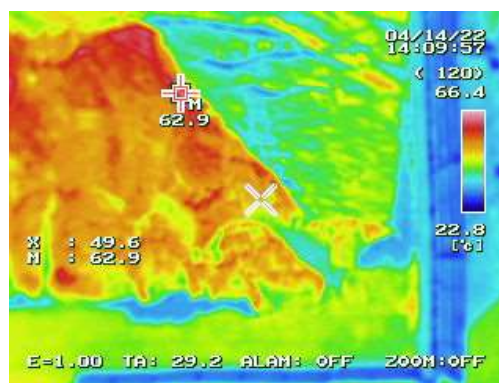
項目	參數	備註
航高	50m	地面解析度約為 23cm/pixel
飛行速度	1~3m/s	

8.3.2 煤炭堆溫度準確性測試

為了驗證熱影像能夠從高空精準紀錄煤堆等易燃危險儲物的即時溫度，本期計畫在港區某物流公司協助下，提供有露天煤堆堆放場域做影像蒐集。並在中午1~2點前往做煤堆影像拍攝，飛行高度使用48公尺做拍攝，如圖 8.12：



(a)



(b)

圖 8.12 (a)煤堆光學影像(b)熱影像

其中，熱影像可以標示出影像中最高溫位置。為了驗證熱影像數據正確性，研究團隊當下也在徒步能抵達位置做探針式溫度儀(圖 8.13)量測其中四個點來驗證(圖 8.14)：



圖 8.13 探針式溫度儀

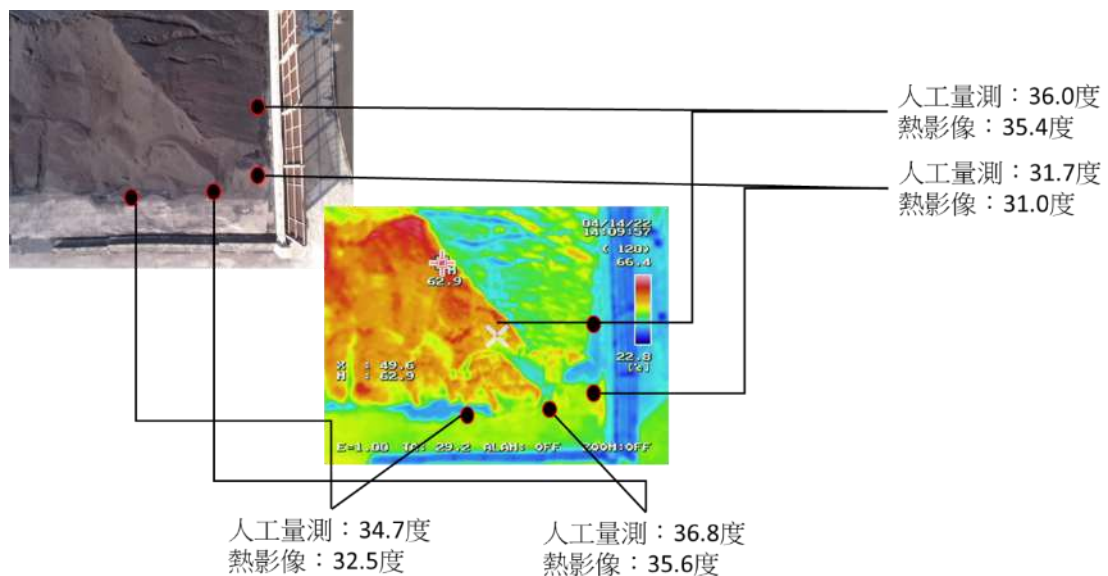


圖 8.14 人工量測位置與溫度量測結果比較

因此可以確定熱影像所量測溫度準確性落在 $\pm 2^{\circ}$ 。該次巡檢團隊使用12分鐘完成約3200平方公尺煤堆影像。更可以從影像中判斷煤堆儲倉是否有定期灑水降溫(圖 8.15)：

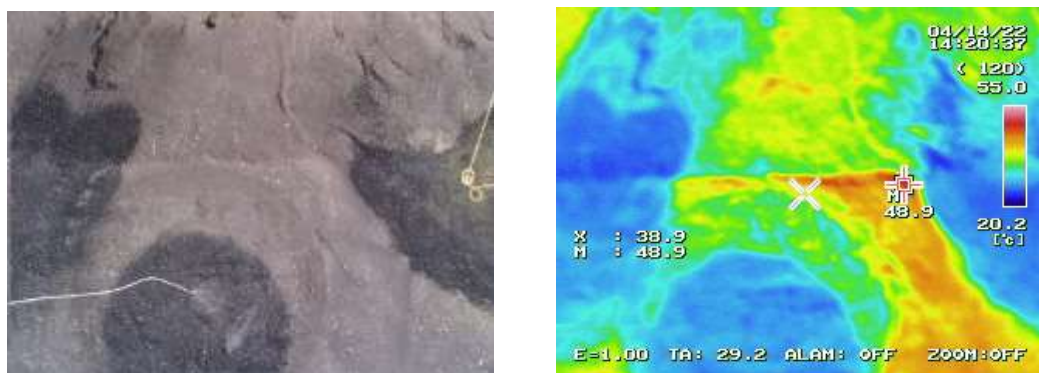


圖 8.15 煤堆灑水影像示意圖

8.3.3 植栽 NDVI 分析

標準化植被指數(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)藉由綠色植物將三原色的紅藍色光吸收並反射綠色光的原理做影像中植栽判斷。而植栽除了反射可見光的紅藍波段光譜，也會反射人眼無法觀測到的近紅外光等較低頻率波段光譜。因此NDVI即是採分析這些資訊來分析影像中植被位置，而NDVI公式如下：

$$\frac{R_{NIR} - R_{VIS}}{R_{NIR} + R_{VIS}} \quad (32)$$

其中 R_{NIR} 為近紅外光資訊， R_{VIS} 為可見光通道資訊，如紅光和藍光。而熱影像即為紅外線光譜的偵測。因此本次將熱影像所獲得的資訊作為 R_{NIR} 的資訊，來推算NDVI值。

而NDVI的數值會落在-1~1之間，而各數值代表意義見表 8-7：

表 8-7 NDVI 數值各區間代表意義

NDVI 數值	意義
-1~0	水體、雲、雪、其他非植被
0~0.1	貧脊岩石與沙子
0.2~0.5	灌木、草地
0.6~1.0	茂密植被

因此本節會採用NDVI值落在0.2~1視為植栽。基於NDVI公式與植栽反射光線原理，本期測試不同光線波段來推算NDVI數值。比較利用甚麼波段的光線結合熱紅外線影像能夠精準量化植栽分布位置。為了驗證熱紅外線影像的加入有提升植栽辨識效果，也加入純光學影像推算的NDVI值。相互比較各項指標的準確性。本節會測試以下三種指標：

$$NDVI_{Rir} = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red}} \quad (33)$$

$$NDVI_{Bir} = \frac{R_{NIR} - R_{blue}}{R_{NIR} + R_{blue}} \quad (34)$$

$$NDVI_{RGB} = \frac{R_{red} - R_{blue}}{R_{red} + R_{blue}} \quad (35)$$

$NDVI_{Rir}$ 即為使用紅外線影像與可見光紅光波段影像的NDVI值；
 $NDVI_{Bir}$ 即為使用紅外線影像與可見光藍光波段影像的NDVI值；
 $NDVI_{RGB}$ 即為使用可見光紅光波段與可見光藍光波段影像的NDVI值。
 以下選取無人機拍攝植栽影像如圖 8.16所示：

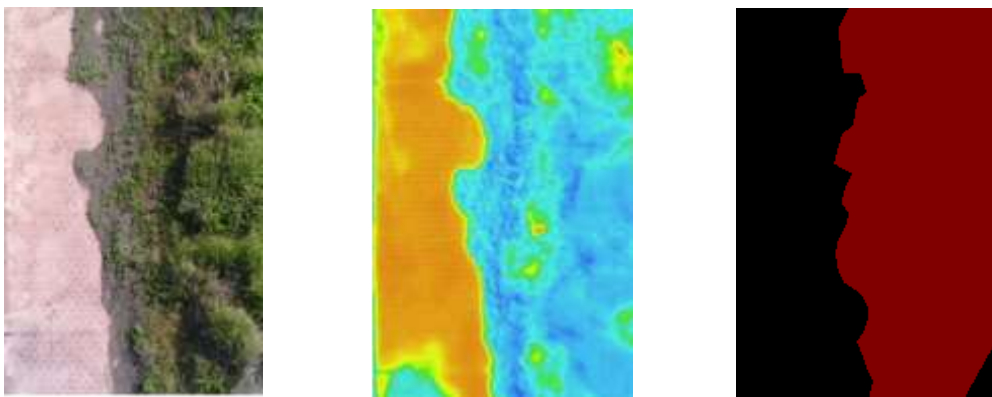


圖 8.16 植栽影像(左)與紅外線影像(中)與植栽位置框選(右)

從影像中可以確地影像右半部為植栽，因此將其框選起來，做為與NDVI辨識結果做驗證的判斷標準。帶入以上三種不同NDVI指

數做解算，可以獲得以下NDVI成果(圖 8.17)：

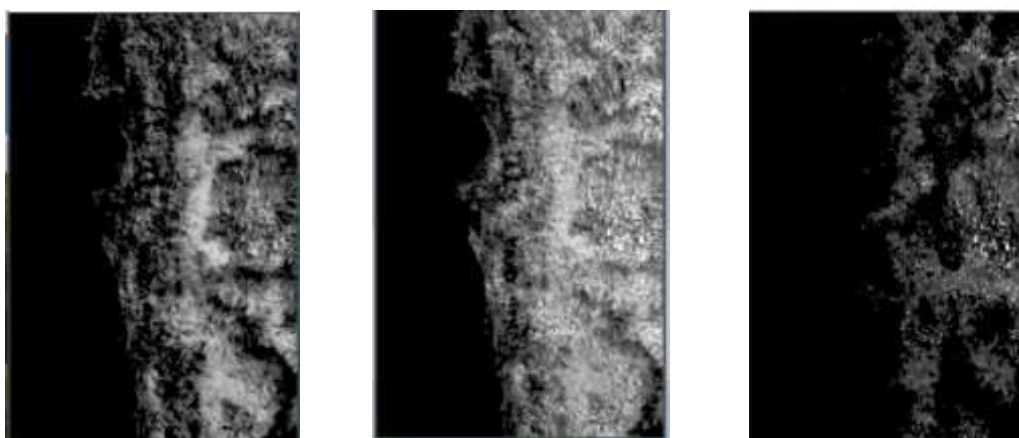


圖 8.17 $NDVI_{Rir}$ (左)、 $NDVI_{Bir}$ (中)、 $NDVI_{RGB}$ (右)

獲得三項不同NDVI圖，與植栽位置做比較，並做混淆矩陣的計算來判斷這三項指標的表現。其中混淆矩陣如表 8-8所示：

表 8-8 混淆矩陣

	實際為植栽	實際不為植栽
NDVI 預測為植栽 (NDVI : 0.2~1)	TP	FP
NDVI 預測不為植栽 (NDVI : <0.2)	FN	TN

確立上述植栽與混淆矩陣的分類，進一步計算準確率(Accuracy)與精確率(Precision)來判斷上述三NDVI指標表現：

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (36)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (37)$$

準確率高，表示該指數能夠正確判別植栽與非植栽；精確率高則表示高指數能夠將相片中所有植栽辨識的比率。因此上述三指標的準確率與精確率見表 8-9：

表 8-9 三種計算 NDVI 指標與真值的準確率與精確率

	$NDVI_{Rir}$	$NDVI_{Bir}$	$NDVI_{RGB}$
Accuracy	85.6%	92.3%	70.9%
Precision	93.6%	89.8%	99.9%

因此從上表可以發現 $NDVI_{Bir}$ 有較為準確的表現。 $NDVI_{RGB}$ 的表現則可能有缺漏植栽的辨識機率較高。

使用另外一個區塊的影像做進一步驗證：

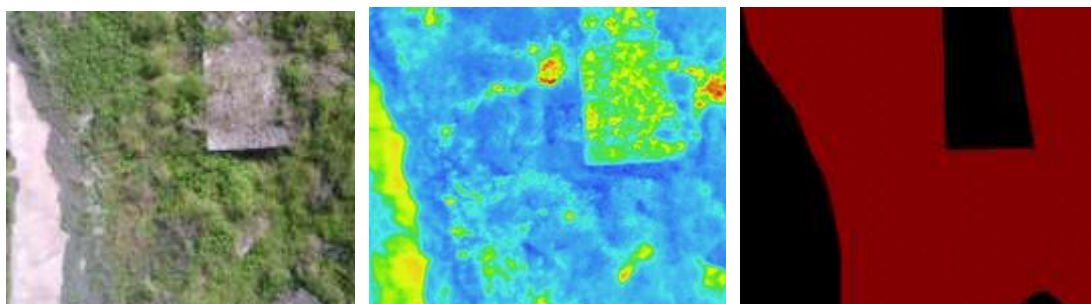


圖 8.18 測試二植栽影像(左)與紅外線影像(中)與植栽位置框選(右)



圖 8.19 測試二 $NDVI_{Rir}$ (左)、 $NDVI_{Bir}$ (中)、 $NDVI_{RGB}$ (右)

表 8-10 測試二，三種計算 $NDVI$ 指標與真值的準確率與精確率

	$NDVI_{Rir}$	$NDVI_{Bir}$	$NDVI_{RGB}$
Accuracy	54.7%	76.9%	45.2%
Precision	95.5%	95.6%	99.4%

從兩次測試可以驗證本次成果結論： $NDVI_{Bir}$ 有較為準確的表現； $NDVI_{RGB}$ 的表現則可能有缺漏植栽的辨識機率較高。

8.4 淤沙範圍變化分析

透過無人機進行北防砂堤淤沙範圍分析，共計拍攝二個梯次的北防沙堤全區影像，第一期為2021/3/28(9:00~12:00) 拍攝，第二期為2021/9/2(12:00~16:00) 拍攝。第一期成果如圖8.20(a)所示，黃色實線為沙洲可視面積，共計28.54公頃，黃色虛線為沙洲水下可視面積，共計44.64公頃，該時期沙洲總面積為73.18公頃，以最內陸至海岸線

之直線距離量測為300.6公尺。第二期成果如圖8.20(b)所示，沙洲總面積如紅色實線，共計163.86公頃，並於圖標示0m高程線之位置。以最內陸至海岸線之直線距離量測為738.8公尺。如圖8.20(c)所示，為兩期影像套疊成果，可得知這兩個時期的沙洲可視面積差異約為90.68公頃。此外，第一期拍時間為高潮位，第二期拍攝時間為低潮位，透過正射影像得知，能夠顯示在不同潮位期間，判斷沙洲的裸露面積情況以及海岸線的變化，附件二也有針對北淤沙區所進行的單點環飛及巡檢模式的拍攝參數及結果。



(a)



(b)



(c)

圖 8.20 (a)第一期北防沙堤影像 (b)第二期北防沙堤影像 (c)兩期套疊

8.5 沙洲建模分析

本期計畫增加北防砂堤影像蒐集事項，為了建立北防砂堤沙洲堆積之體積，進而做出後續措施。本節利用目前市面上的商用軟體，在沒有地面控制點校正的情況下進行3維建模。也嘗試利用開源軟體做建模。比較兩者之間的差異並評估是否能夠將建模功能加入平台中供使用者操作。本次使用150張照片做建模素材，而建模效果如圖 8.21：



圖 8.21 PhotoScan 建模效果(左)與開源軟體建模效果(右)

從上述結果初步分析，發現商用軟體在照片拍攝處重疊少的位置(黃色框)有較優良的成果。但兩者在資料充足下均有成功完成沙洲沙體的建模。取相同範圍的沙洲點雲(紅色框)來計算兩建模的沙洲點雲密度並整理於表 8-11：

表 8-11 兩方法建置沙洲模型規格與細節

軟體	製作時間	點雲數量	10*10m ² 點雲密度(紅色框框)
PhotoScan	3.5 hr	3656,6496	268.4
開源軟體	10 hr	4818,8964	1987.44

幾何驗證上，透過量測防波堤寬度來確認模型幾何狀態。利用110年度計畫開發的高精度台中港正射底圖做為真值。量測點雲中較為顯著的防波堤寬度，如圖 8.22所示：



圖 8.22 臺中港區高精度正射底圖與量測防波堤寬度(紅線)

從正射底圖量測到的寬度為2.12公尺；利用PhotoScan製作的點雲量測相同位置防波堤寬度為2.49公尺；利用開源軟體製作的點雲量測相同位置防波堤寬度為1.86公尺，並將結果列於表 8-12

表 8-12 防波堤寬度比較表

	正射底圖	PhotoScan	開源軟體
防波堤寬度	2.12m	2.49m	1.86m

從上述結果顯示，利用空拍影像製作沙洲建模來監測是可行的。在沒有任何地面控制點的校正情況下，透過無人機空拍影像建模落在 $\pm 30\text{cm}$ 的誤差。未來透過增加現場拍攝的資訊能夠進一步優化建模成果。

8.6 本章小結

為了讓巡檢影像可以獲得更多資訊，諸如是否目標物存在、目

標物損失程度等等，使用了Yolov4與Mask RCNN兩種不同種類模型做連續的辨識，達到適合港區巡檢所需，並且考量該模型偵測的準確性與執行效率，提升無人機巡檢效率。

更加深分析模型提出的信任指數給予未來操作人員參考每次結果，有效利用人力去二次確認有問題位置，未來隨著巡檢次數增加且在不同時段做更多不同樣貌的資料蒐集，諸如滿潮抑或是退潮、陰天與晴天等各式各樣資料，使巡檢流程所使用的模型仍舊可以更加優化，並提供更多元化驗證資料，未來仍可朝該方向去做探討與改善，並且提供相關巡檢影片驗證影片辨識結果有改善單張相片可能出現角度與其他原因造成的偶然性錯誤。

位移監測與淤沙範圍變化則需要長期觀察，且拍攝時間要考慮漲退潮，方能在後續分析時能有更客觀的驗證，以目前影像精度雖可粗略計算面積或位移變化，但無法進行更進一步分析，建議未來能依據港區潮位資訊，於同一時間點以及注意在退潮零米線進行拍攝，以獲得更一致而完整的淤沙範圍判識。

此外，透過測試無人機空拍光達影像、紅外線熱影像與傳統光學影像，不僅可以提供基本的影像資訊外，透過後續的分析能夠獲取更深層資訊。如溫度的監測、植栽的分類以及沙洲體積建模等。針對這些測試的驗證，未來可以套用到更多元的場景來做整體港區的即時監測。

第九章 無人機影像整合管理平台

平台提供之功能包括電子地圖、UAV航線規劃、UAV影像匹配及量測分析功能等四大模組，透過平台之建立，期能輔助港區管理人員針對港區轄管區域及重要設施進行高效率、高強度之維護管理，圖 9.1為模組架構圖，平台詳細頁面見附件三，各模組相關說明見 9.2節。

9.1 使用者操作平台系統架構

本計畫於開源GIS平台系統係以leaflet為基礎，將GIS平台做為本系統的介面，透過HTML5、CSS3、JavaScript、jQuery與Bootstrap等現代網站前端開發工具，建立動態、美觀、簡潔且資料視覺化的網站平台，並將提供不同解析度的手持裝置與電腦畫面上使用。此外，本系統以網站形式開發可以達到方便維護、發布與測試等作業，即以SaaS(Soft as a Service)概念進行本系統開發，當此平台完成後即是可運用的成品，不需要再透過程式安裝等步驟，另外網站程式具備輕量與發佈快的特性，對於開發者維修容易而使用者應用亦方便。這種開發特性不用特別安裝Plugin的方式強化圖台功能，使其可於瀏覽器上直接進行既有地理資訊查詢功能操作，並以等同Google Map的演算圖資方式，進行圖資的串流處理與套疊工作。由於本平台功能應用牽涉於大量資料的整合與展示，故在系統後端的架設上為重要的一環，在需儲存大量圖資資料情況下，資料庫的建立與連結為前後端整合的重要關鍵。

前端架構上，視覺設計採用HTML、CSS及Bootstrap等開發工具，建立網站中的所有元件以及其樣式，並且可以達到RWD設計，以使平台可適用於各解析度裝置。

操作與事件監聽上，以JavaScript為平台動態操作為主要核心，透過元件事件觸發的監聽，能進行動態排程更新與人機介面互動設計，以打造符合使用者理想中的瀏覽動線配置與流暢度。

資料視覺化上，可利用資料視覺化工具進行多樣式的統計圖表

製作，如曲線圖、時序列圖、圓餅圖與次數分配圖等，另外使用者可與圖表互動，以得到更多資訊。

互動式地圖開發上，採用leaflet達到2D Web-GIS的功能，以供圖層查看、疊圖分析及位置查看等服務，此外亦可介接網路地圖服務以及圖層影像。

整體上，平台開發基於SaaS概念，故平台開發完畢後透過網站伺服器發布即可使用(不須透過程式安裝等程序)，同時後續若需要更新與維護亦具方便性。而前端介面設計上，因採用的開發工具皆為現代化所開發，皆屬於現代網站開發所流行的技術，可客製化調整性高。

9.2 平台模組說明

整體平台架構及頁面呈現如圖9.1所示，相關模組說明如下：

(1) 多重圖層展示模組：

除正射底圖外，系統亦提供多重圖資（如土地使用分區或地籍圖資等）之存取與套疊展示，有利使用者進行相關資料之查看與評判，點擊畫面右側影像區域右上角的底圖選擇功能，即可選擇相關資料進行套疊展示，以此可清楚得知各區域的分割關係，以便進行進一步之分析。

(2) UAV航線規劃模組：

針對不同巡檢任務，平台提供三種飛行模式，分別為1)單點環飛：選擇指定目標物後，系統自動根據與目標物之距離、周圍建物高度及資料蒐集精細程度等條件，以目標物為中心，生成圓形之飛行軌跡；2)多點巡航：選擇指定目標物後，點擊指定飛行點位，系統根據相關資訊生成飛行軌跡；3)地形測繪：圈繪指定飛行區域後，系統根據選取區域及預設之影像重疊率進行航線規劃。

(3) UAV影像匹配模組：

分別在中突堤及北突堤以每10公尺為一單位設置POI(Point of

Interest)點，UAV影像將根據拍攝坐標位置匯入對應的POI，匯入的影像會根據拍攝日期依序儲存，同時與基期影像進行校正匹配，讓使用者檢視變化。

(4) 影像量測分析模組：

點擊影像量測區域內之量測按鈕，啟動量測工具，可自行選擇距離量測或是面積量測。若為距離量測，則於右側之影像上進行兩特定點位置或範圍之標定，系統可根據正射影像中之相關資訊，計算該點或該範圍真實物空間中之直線距離和面積；此外，若選擇數值模型圖層，則可以量測點位之高層。



(a)



(b)

圖 9.1 (a)臺中港區無人機影像管理平台架構 (b)管理平台頁面

9.2.1 量測功能

系統支援使用者於圖台上進行量測，透過於圖台上點選特定點位，系統自動取得該點位之坐標值及數值地形模型之高程值，將相關資訊呈現給使用者。

點擊系統左側選單，開啟影像量測區域選單(圖 9.2)，系統具備距離量測、面積量測及高程量測等三種工具，點擊對應之按鈕啟動量測工具後，可於右側之影像上進行特定點位置之選取，系統可根據正射影像或數值地形模型中之相關資訊，計算劃定範圍內於真實物空間中之面積、距離及高程，如圖 9.3所示。



圖 9.2 量測工具頁面



圖 9.3 各不同量測模式成果

系統支援撥放uav巡檢影片，供使用者查看巡檢內容，並配合計算uav飛行軌跡，即時呈現各時間點影像與其所在之真實空間位置，如圖 9.4。

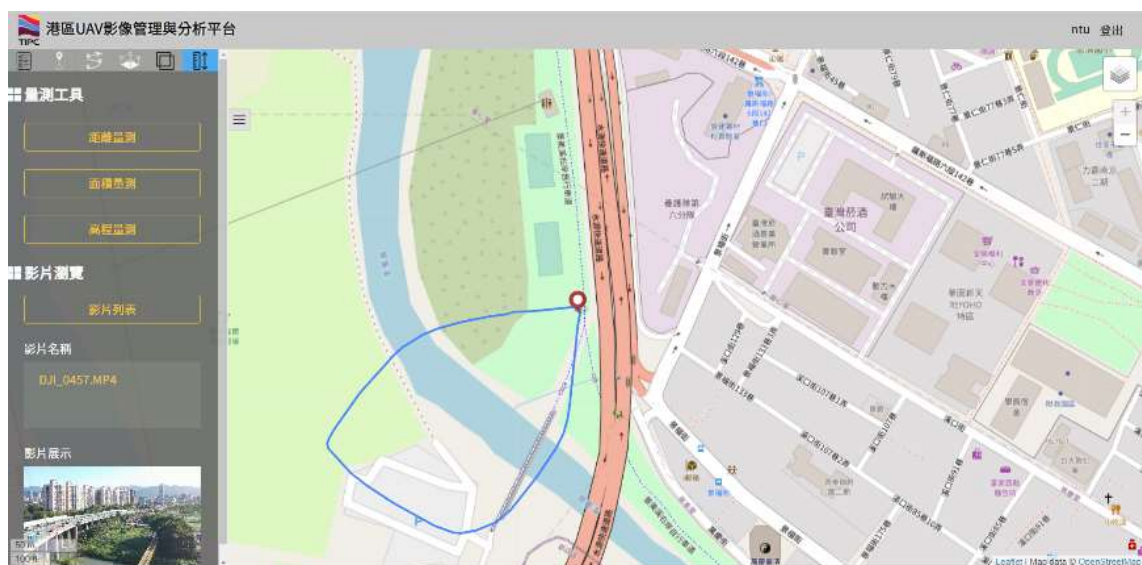


圖 9.4 UAV 影片撥放及軌跡查看

9.2.2 UAV 航線規劃

針對不同之資料蒐集目的，平台提供三種飛行模式，各模式規劃之成果如圖 9.5所示。

(1) 單點環形：

選擇指定目標物後，系統自動根據與目標物之距離、周圍建物高度及資料蒐集精細程度等條件，以目標物為中心，生成圓形之飛行軌跡。

(2) 多點巡航：

選擇指定目標物後，點擊指定飛行點位，系統根據相關資訊生成飛行軌跡。

(3) 地形測繪：

圈繪指定飛行區域後，系統根據選取區域及預設之影像重疊率進行航線規劃。

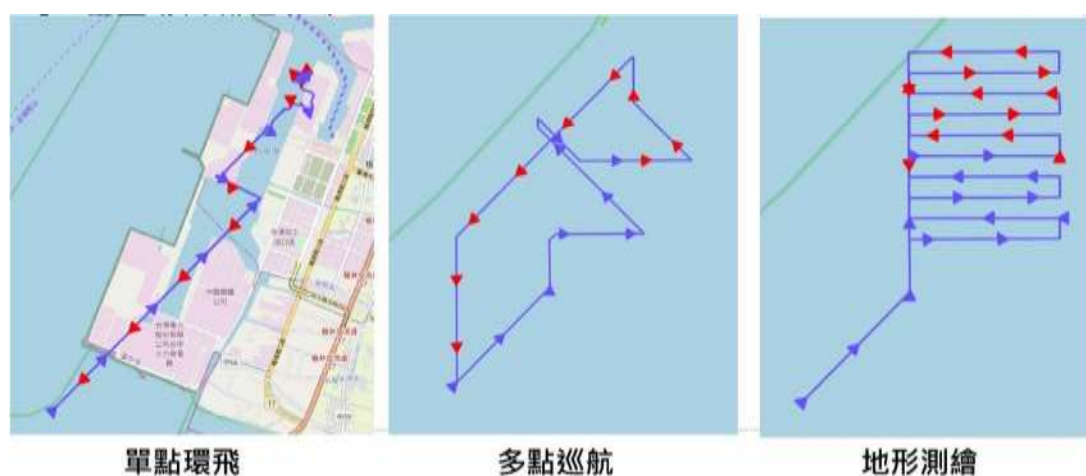


圖 9.5 各飛行模式規劃成果示意圖

使用者開啟各飛行模式之頁籤，於右側電子地圖內點選輸入起訖點及目標區域，輸入各項飛行參數後(圖 9.6)，點擊規劃參數設定對話框中，執行飛行路線規畫之按鈕(圖 9.8紅框處)，系統自動規劃飛行路徑並跳出提示(圖 9.9)。



圖 9.6 飛行點位圈繪及規劃參數輸入



圖 9.7 規劃提示視窗

使用者透過系統頁面輸入相關規劃資訊後，系統自動進行航線規劃，使用者可透過路徑規劃查詢功能(圖 9.8)，點擊列表(圖 9.9)或輸入專案編號(圖 9.7內專案編號)進行規劃成果查看。



圖 9.8 路徑規劃查詢頁面

規劃成果列表			
專案編號	模式	狀態	規劃耗時(秒)
382	單點環拍	規劃完成	17
381	多點巡航	規劃完成	15
380	多點巡航	規劃完成	15
379	多點巡航	規劃完成	15

圖 9.9 規劃成果列表

點擊列表內之專案編號，系統即會將規劃成果呈現於頁面上(圖 9.10)，於頁面右側顯示規劃飛行之路徑，於頁面左側顯示專案編號、規劃模式、規劃狀態、規劃耗時、詳細內容按鈕及匯出檔案按鈕，其中，點擊詳細內容按鈕可查看規劃之細節(圖 9.11)，除原始輸入系統內之規劃參數外，可查看規畫後的附加訊息，包含：實際飛行時間、飛行距離、警告代碼及警告訊息；點擊匯出檔案按鈕，則可將規劃之路徑內容輸出成符合uav讀取之文件規格，以達成uav進行無人操縱飛行之目的。

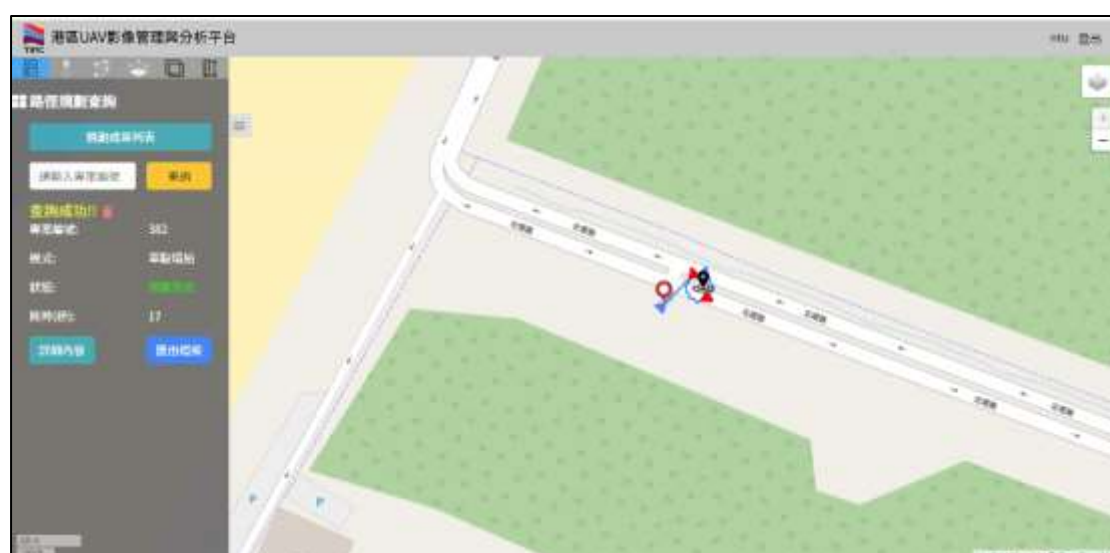


圖 9.10 規劃成果查詢展示

查詢規劃參數結果

航線模式:

單點環行

環拍半徑:

10

起始點位(X,y):

[[201526.94267],[2688175.6]

路徑點位(X):

[201553.25060]

路徑點位(Y):

[2688185.59526]

飛行速率(m/s):

3

航高(m):

15

相對飛行方式:

0

緩衝區大小:

6

可飛行時間(分):

20

實際飛行時間(分):

0.3

拍攝角度(度):

45

安全係數:

0.7

飛行距離(m):

52.935

警告代碼:

警告訊息:

▽

圖 9.11 規劃參數結果查看

9.2.3 UAV 影像查看

系統支援使用者透過網頁介面(圖 9.12)將uav影像上傳，上傳完成後，系統擷取影像資訊檔內的坐標訊息，將該影像歸類於特定位置之poi(Point of Interest, POI)內，並且在上傳完成後，提供AI物件辨識的功能，針對防撞墊、反光板、車檔及繫船柱的存在狀態進行辨識，並將成果呈現於頁面上供使用者查看。



圖 9.12 UAV 影像上傳頁面

影像完成上傳及AI辨識後，點選影像匹配頁籤->物件辨識成果列表查看->列表查看，即會顯示物件辨識成果列表(圖 9.13)，此列表展示各期上傳之影像拍攝日期，每期影像每個poi若有分配到對應位置的影像，亦會將各物件的數量顯示於表格內；點擊表格內之日期，可開啟該日期巡檢影像軌跡之圖層(圖 9.14紅框處)，勾選開啟圖層後，該期之影像及影像涵蓋範圍會顯示於圖台之上，供使用者確認該次拍攝，是否有涵蓋到所有欲拍攝之位置，其中，點擊圖台上的任意影像框(圖 9.14紫框處)，可查看對應之影像(圖 9.15)；點擊列表中，各設施物數量辨識成果超連結，可開啟影像(圖 9.16)，影像中展示AI模型辨識到的物件位置及可靠度。

POI編號	2022-09-23	2022-08-19	2022-07-26	2022-06-21	2022-05-31	2022-04-14	2021-11-11
245	拾遺物(1)/反 光緒(2)/中樓 (3)/保衛社(2)	拾遺物(1)/反 光緒(2)/中樓 (3)/保衛社(2)	拾遺物(1)/反 光緒(13)/中樓 (1)/保衛社(4)	拾遺物(2)/反 光緒(28)/中樓 (1)/保衛社(1)	拾遺物(1)/反 光緒(11)/中樓 (1)/保衛社(1)	拾遺物(1)/反 光緒(12)/中樓 (1)/保衛社(1)	拾遺物(1)/反 光緒(12)/中樓 (1)/保衛社(1)
442			拾遺物(1)/反 光緒(20)/中樓 (3)/保衛社(2)	拾遺物(1)/反 光緒(11)/中樓 (1)/保衛社(1)	拾遺物(2)/反 光緒(11)/中樓 (1)/保衛社(1)	拾遺物(1)/反 光緒(12)/中樓 (1)/保衛社(1)	拾遺物(1)/反 光緒(11)/中樓 (1)/保衛社(1)

圖 9.13 物件辨識成果列表



圖 9.14 UAV 影像軌跡及涵蓋範圍圖

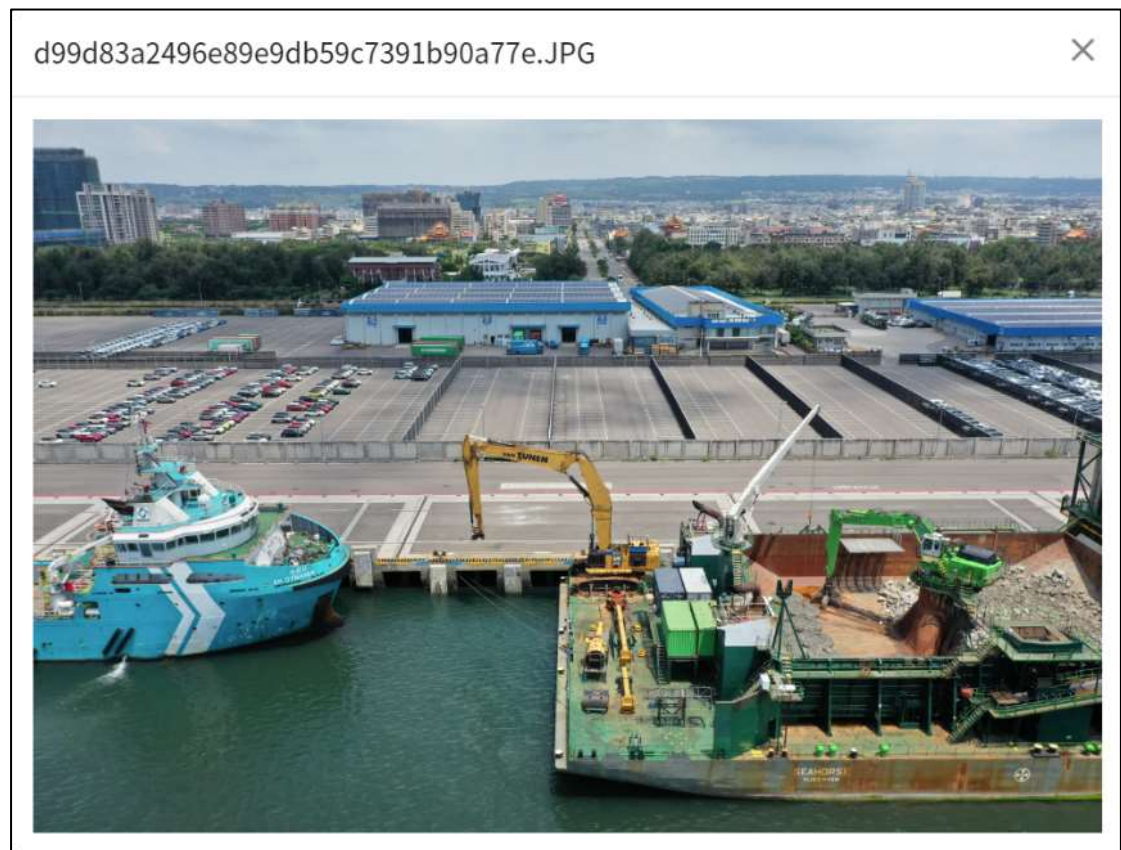


圖 9.15 點擊影像框後查看對應影像



圖 9.16 物件辨識成果影像

9.2.4 岸邊設施物件辨識成果列表

影像上傳完成後，系統即會自動進行設施物辨識，設施物內容包含反光板、車檔及碰墊，辨識完成後，點擊影像匹配頁籤->設施物辨識成果->列表查看，列表(圖 9.17)內顯示poi編號及各期影像之辨識成果，其中，點擊poi編號超連結可查看該poi之基礎資料影像(圖 9.18)，後續的比對都是與基礎資料作比對；各期辨識成果內容為，相較於基礎資料，各設施物之存在、毀損及缺失數量，點擊該超連結，可查看該期影像辨識成果(圖 9.19)，成果中，藍色點為缺失物件之位置，綠色點為毀損物件之位置。



圖 9.17 設施物辨識列表



圖 9.18 原始辨識成果



圖 9.19 各期辨識成果

9.2.5 北堤路路燈物件辨識成果

團隊將使用AI影像辨識所得之北堤路路燈位置，建立為獨立圖層資料，供使用者查看，透過開啟該圖層，路燈之位置顯示於圖台之上(圖 9.20)，點擊各標籤，可查看對應之影像，影像中標示有路燈位置及可靠度。



圖 9.20 路燈辨識影像

9.2.6 北堤路路面破損評分

團隊將使用AI影像辨識所得之各類型異狀，根據路面分級制度，將各區塊路面進行評級，並使用不同顏色標註，以利使用者快速了解各路面區段之狀態，使用者點擊開啟”北堤路PCI”圖層後，北堤路的位置會有顏色區塊的圖層展示(圖 9.21)，並於左下方產生圖例，方便使用者進行比對查看。

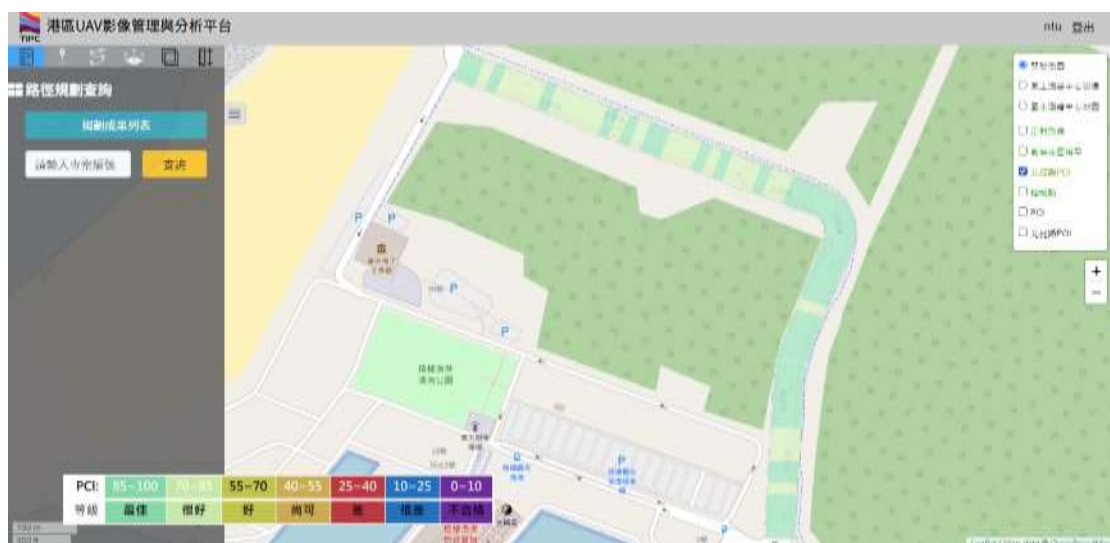


圖 9.21 北堤路路面破損評分展示頁面

9.3 本章小結

本計畫開發建立電子地圖圖台，做為資料展示介面，介接其他單位提供之WMS/WMTS標準化圖磚資料做為底圖外，並基於團隊過去兩年執行飛行任務的成果影像，進行各項分析與辨識，將相關成果整合於圖台之上，提供使用者一快速掌握港區情況之實用工具，輔助使用者進行港區及周遭位置狀態之理解及判斷。除資料展示外，系統亦提供uav航線規劃功能及量測功能等工具，期能輔助使用者順利推進相關業務執之進行。此外，本系統以開放式架構開發，未來將可視需求持續拓展並增加新功能，以進一步發揮其於港區維護管理之效力與範圍。

第十章 實地驗證與品質評估

10.1 無人機飛行相關檢核

10.1.1 飛行範圍與作業時間

為了確認無人機的飛行能力與作業時間，以確保巡檢作業能夠順利執行，本計畫案以兩個實際巡檢的案例進行分析，運用本計畫 Typr2 Parrot Anafi 無人機比較在不同情況下，以數值驗證方式確認無人機的飛行能力與飛行時間。最後提供適合的建議做為回饋，以利於巡檢作業執行。本計畫共分為兩個案例探討，首先為案例1，是在天氣晴朗風速較小的條件下進行現地巡檢，詳細飛行條件如表 10-1 所示。當天風速為3m/s，屬於輕風。透過飛行紀錄顯示，經過7.63分鐘的巡檢後，電量消耗為31.04%，如圖 10.1 (a)表示電量與飛行時間之關係，如式(15)以一階直線方程式計算後得知每分鐘電量下降4.11%。飛行距離可達到2285m，如圖 10.1(b)為飛行時間與距離關係圖。

$$y = ax + b \quad (15)$$

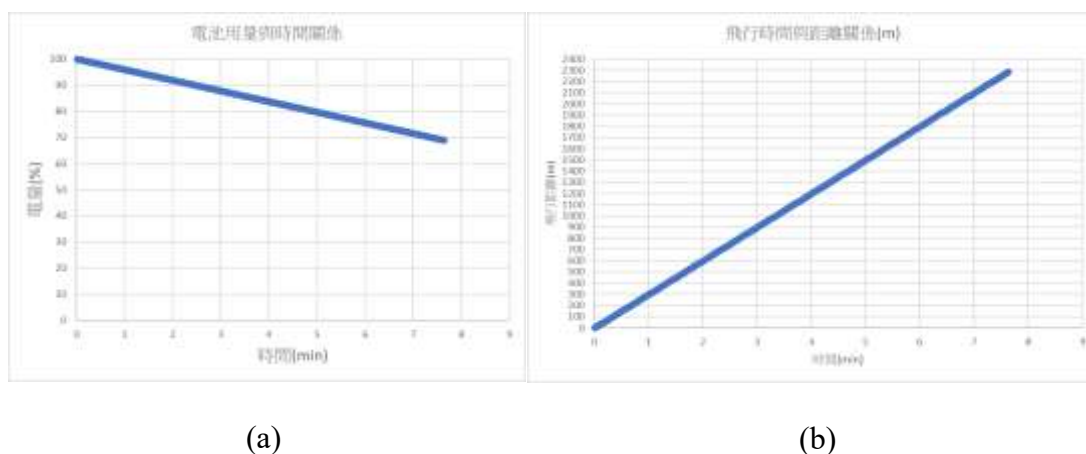
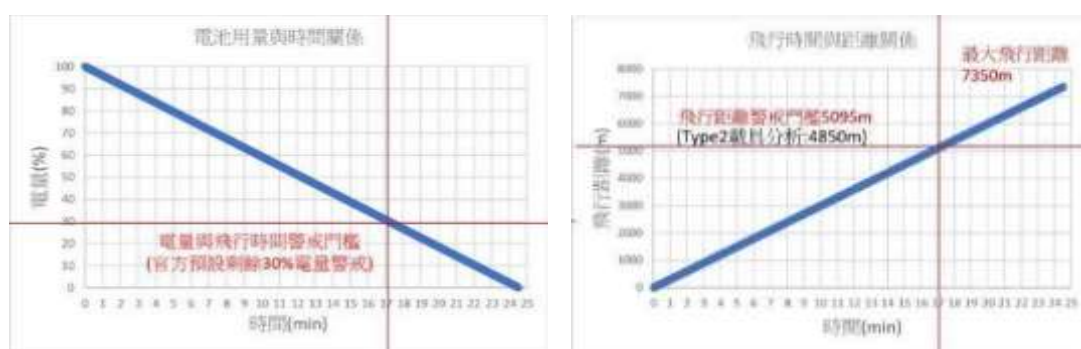


圖 10.1 (a)案例 1 電量與飛行時間關係圖(b)飛行時間與距離關係圖

表 10-1 實際飛行數據表(2 級風)

項目	數值
風速	3m/s(2 級風)
飛行時間	7.63 分鐘
電池使用量	31.04%
每分鐘下降電量	4.11%
飛行距離	2285m
飛行航高	60m

透過這樣實際飛行的數值，再以線性推估後續的飛行時間與電量消耗狀況，如圖 10.2(a)所示，得知每分鐘電量下降約4.11%，推估直到24.51分鐘時電量完全耗盡，如表 10-1所示與圖 10.2(b)所示，此時的電量耗盡飛行距離推估為7350m。此外，該台無人機官方數據註明最大飛行時間為25分鐘，得知在天氣狀況良好時，顯示推估的數據成果與官方公告是一致的。



(a)

(b)

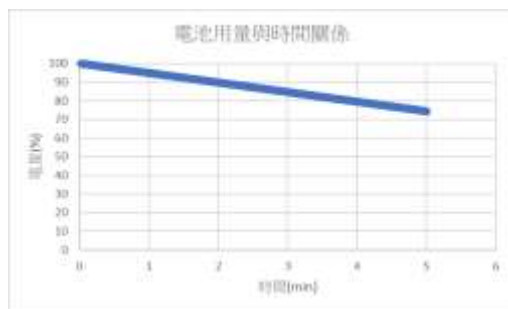
圖 10.2 (a)推估電量與飛行時間關係圖(b)推估飛行時間與距離關係圖(2 級風)

本計畫依據這個推估成果，提供了建議飛行時間、預留電量、以及飛行距離。如表 10-2及圖 10.2(a)所示，完整一次任務，建議電量最好預留30%，也就是最大飛行時間為70%，故飛行時間安全係數設定為0.7，扣除起降時間推估建議飛行時間為16.34分鐘，建議飛行距離為4903m(表 10-2)。透過這樣的設定，才能確保在飛行途中，遭遇任何緊急情況時有足夠的電量能夠處理。

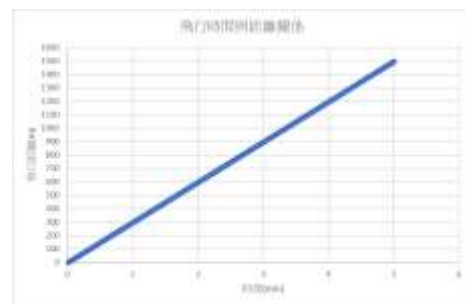
表 10-2 以實際案例推估飛行數據表（2 級風）

項目	數值
電量耗盡飛行時間	24.51 分鐘
電量耗盡飛行距離	7350m
建議剩餘電量	30%(往返)
建議飛行時間	16.34 分鐘(往返)
建議飛行距離	4903m(往返)
飛行時間安全係數	0.7

接著是案例2，是在天氣相當不佳的情況下所進行的巡檢任務，如表 10-3所示，當時風速為8m/s(5級風)，接近Type2無人機的抗風極限(6級風)。在經過5分鐘的飛行任務後，電池使用了26%，飛行距離為1495m(表 10-3)。如圖 10.3(a)與表 10-3所示每分鐘下降電量為5.20%，對案例1下降幅度每分鐘增加了1.09%，表示隨著風速增強電量下降明顯增加。



(a)



(b)

圖 10.3 (a)案例 2 電量與飛行時間關係圖(b)飛行時間與距離關係圖

表 10-3 實際飛行數據表(5 級風)

項目	數值
風速	8m/s(5 級風)
飛行時間	5 分鐘
電池使用量	26.00%
每分鐘下降電量	5.20%
飛行距離	1495m
飛行航高	60m

將案例2推估電量與飛行時間，如圖 10.3(a)與表 10-4，電量耗盡時間為19.46分鐘，電量耗盡飛行距離為5836m。建議剩餘電量為30%，如圖 10.4(a) 扣除起降時間得知飛行時間為12.96分鐘，也就是約為官方公告最大飛行時間的一半，故電量安全係數在天氣狀況不好時，應設定為0.5，建議飛行距離為3889m。

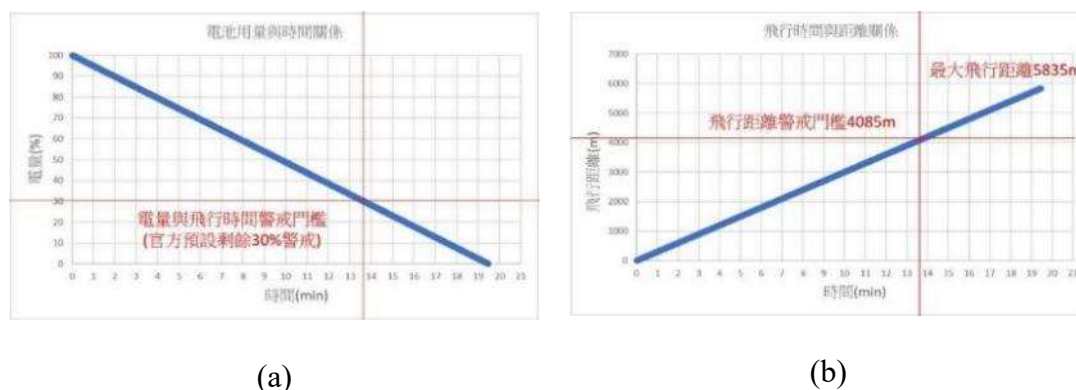


圖 10.4 (a)推估電量與飛行時間關係圖(b)推估飛行時間與距離關係圖(5 級風)

表 10-4 以實際案例以實際案例推估飛行數據表(5 級風)

項目	數值
電量耗盡飛行時間	19.46 分鐘
電量耗盡飛行距離	5835m
建議剩餘電量	30%(往返)
建議飛行時間	12.96 分鐘(往返)
建議飛行距離	3889m(往返)
飛行時間安全係數	0.5

依據這兩個案例的實際驗證，並加以推估無人機的飛行時間與距離，本計畫提供在天氣良好與天氣不佳時的建議飛行參數，以利後續無人巡檢作業順利進行。如表 10-5所示，在天氣良好時(2級風)，建議電量安全係數為0.7，飛行時間不超過16.34分鐘，飛行距離不超過4903m。在天氣狀況不佳時(5級風)，建議電量安全係數為0.5，飛行時間不超過12.96分鐘，飛行距離不超過3889m。

表 10-5 建議飛行參數表統整

天氣狀況	良好	不佳
風速	2 級風(3m/s)	5 級風(8m/s)
飛行時間安全係數	0.7	0.5
建議飛行時間	16.34 分鐘	12.96 分鐘
建議飛行距離	4903m(往返)	3889m(往返)

10.1.2 無人機飛行穩定性及機動性

針對無人機的飛行穩定性，在設定航線規劃後，需驗證實際飛行時，無人機是否依據航線進行飛行。本計畫將中突堤巡檢的飛行數據取出，以相對航高，以及無人機水平位置行分析精度檢核分析。如圖 10.5所示紅色線段為設定航高為60m，藍色點為每個飛行位置的POI相對高度，共計271個。其中可發現高度並非完全重和於設定航高，而是有偶然性的波動，另如圖 10.6為設定航高與實際飛行航高的殘差圖。如表 10-6所示，航高最大差值為0.566m，最小差值為-2.015m，均方根誤差為±1.084 m。

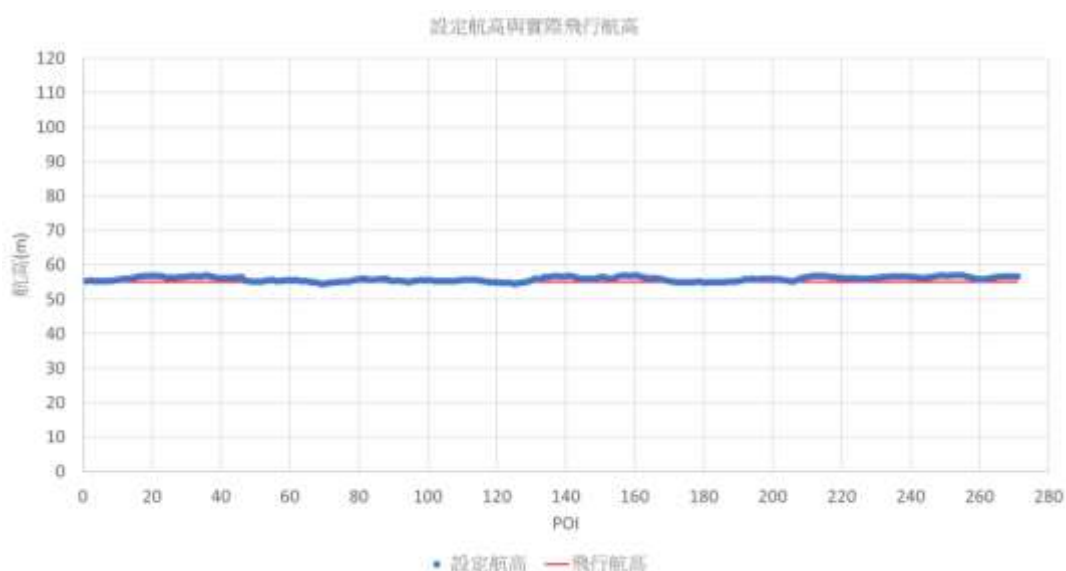


圖 10.5 無人機設定航高與實際飛行航高對照圖

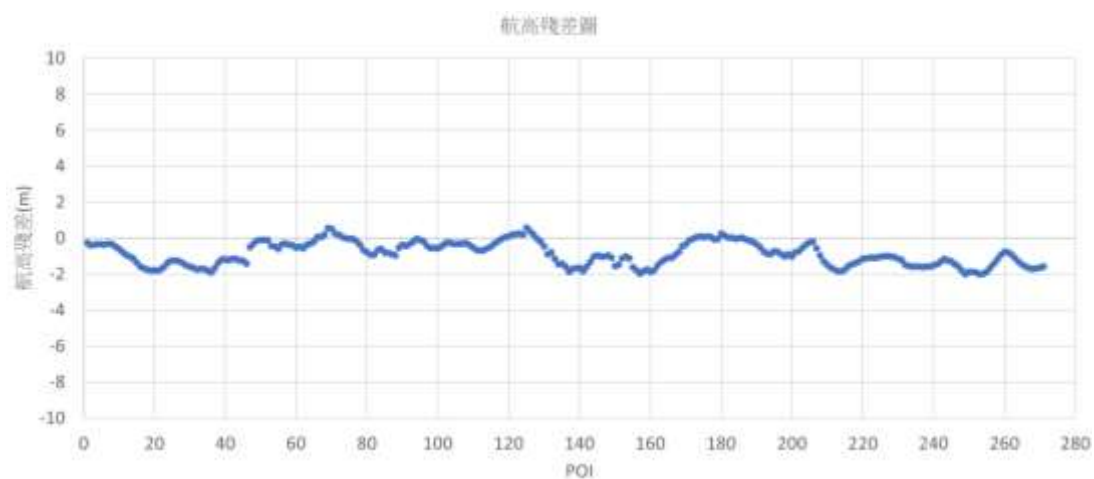


圖 10.6 無人機航高穩定性殘差圖

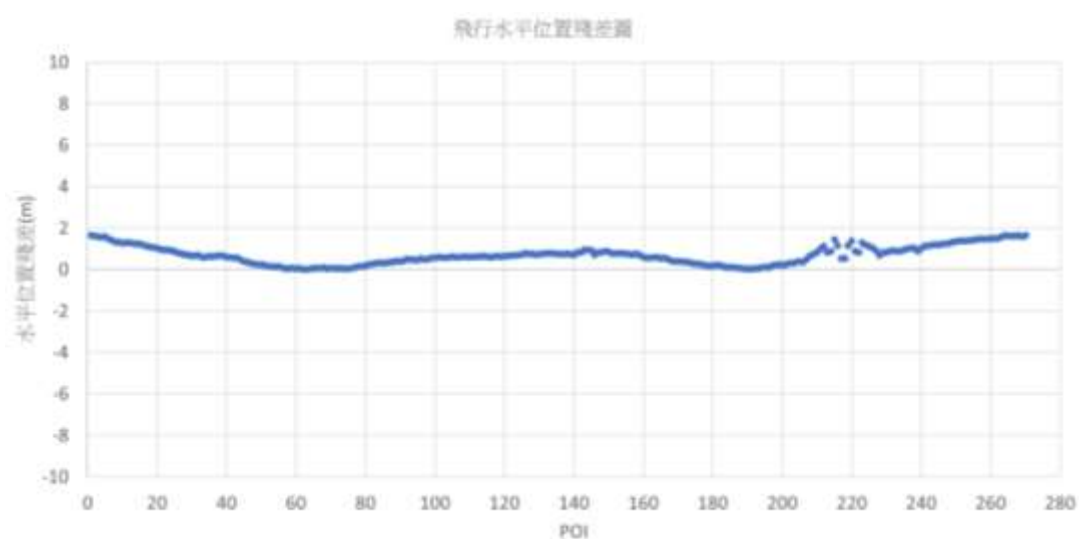


圖 10.7 無人機水平位置穩定性殘差圖

表 10-6 無人機飛行穩定度精度表

項目	航高差值	水平位置差值
最大差值	0.566 m	1.650 m
最小差值	-2.015 m	0.009 m
均方根誤差(RMSE)	± 1.084 m	± 0.817 m

表 10-7 實際飛行位置精度表

項目	航高差值	水平位置差值
最大差值	2.549m	1.601 m
最小差值	0.307m	0.008 m
均方根誤差(RMSE)	± 1.675 m	± 0.870 m

在水平位置方面，將每個POI的水平位置與航線的正交距離視為差值，如表 10-6所示最大差值為1.650m，最小差值為0.009m，均方根誤差為 ± 0.817 m。因此得知在高程方面的精度整體約為 ± 0.817 m。此外，在另一個北防砂堤巡檢案例中，共計150個POI，精度分析如表 10-7所示，整體精度與表 10-6的案例類似，高程差值較大，水平差值較小。整體而言，本計畫無人機上搭載一般晶片型GNSS定位控制航高精度可在 ± 2 m以內，水平位置精度可在 ± 1 m以內，這樣的定位精度對於無人機巡檢已足敷使用。

關於無人機的機動性，從上述結論可得知，無人機的定位精度良好，在配合本計畫航線規劃方法之下，應能適用於障礙物較多的港區碼頭進行巡檢。如圖 10.8所示，為中突堤碼頭現地巡檢碼頭碰墊。



圖 10.8 無人機現地巡檢圖

10.2 無人機影像品質檢核

10.2.1 原始影像解析度檢核

為了在產製正射影像及三維點雲能產生高解析度的成果，原始拍攝影像的品質也就相當重要，本計畫隨機挑選了原始產製全測區正射影像所拍攝的原始影像，共計10張，以確認原始拍攝影像的解析度是否足夠。由於原始影像沒有真實尺度，但能透過像素判斷尺寸，因此本計畫以路面標線做為依據，查看白線與雙白線的寬度。

另白線與雙白線單線寬度皆為十公分(8.2.3節補充規範說明)。在本計畫全區目標解析度5公分設定下，原始影像上看到的白線寬度需為2~3個像素大小，如圖 10.9(a)至(j)所示標線均勻2-3個像素，尤其肉眼可清楚辨識邊界，表示原始拍攝影像已提供了相當足夠的解析度，足以用來產製高解析度的正射影像。另關於原始影像產製正射影像後之實際尺寸檢核，將於9.2.3節說明詳細的驗證成果。



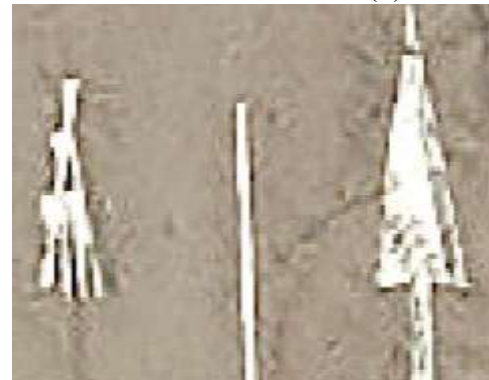
(a)



(b)



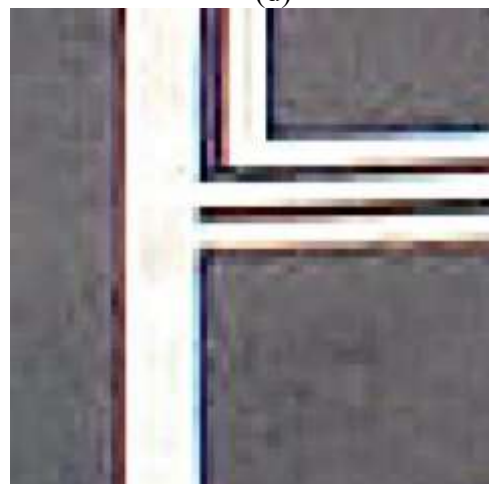
(c)



(d)



(e)



(f)

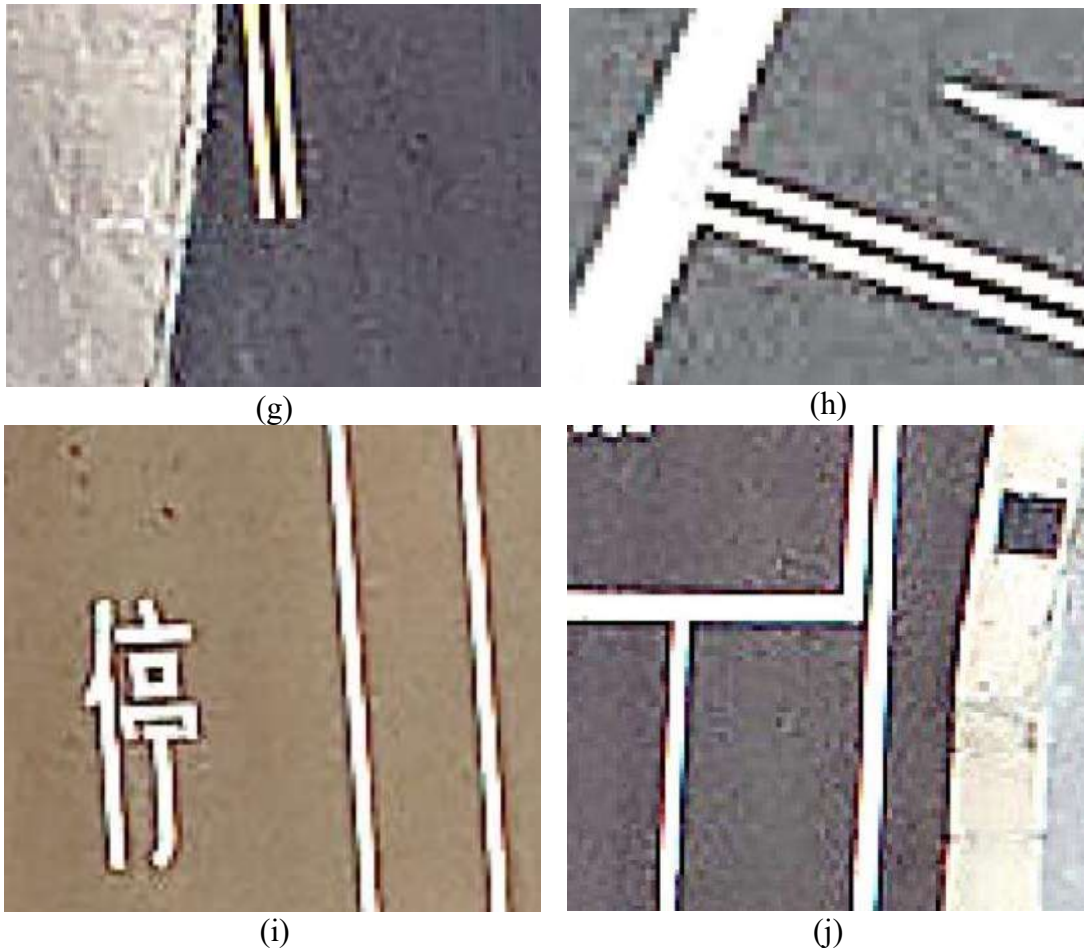
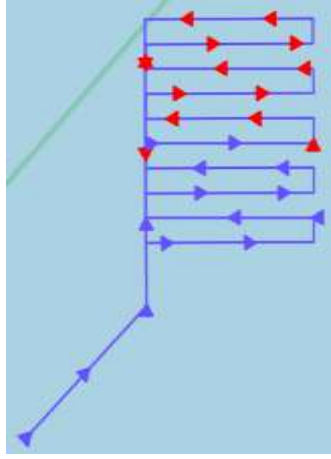


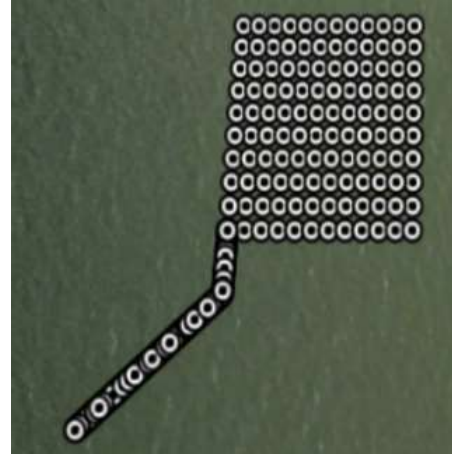
圖 10.9 無人機拍攝原始影像上呈現之港區斑馬線與雙白線圖

10.2.2 無人機路徑正確性測試

無人機的路線規劃透過空拍點做為絕對參考點，再透過像點做相對路徑控制，平台中展示無人機飛行路徑為相對路徑，因此將輸出的無人機路徑坐標輸出至google Earth來分析位置與路徑是否正確(如圖 10.10)。



(a)



(b)

圖 10.10 (a)地形測繪之平台展示圖(b)google Earth 結果圖

10.2.3 影像匹配品質評估

UAV正拍影像與正射底圖進行SURF匹配演算時，依共軛特徵配對獲得匹配點，本計畫在眾多的匹配點當中計算共軛點間歐式距離 ΔL ，並依序排列擇選最佳匹配6組匹配點，保留做為UAV正拍影像進行仿射改正使用之外，同時計算其方均根 (Root Mean Square, RMS) 做為影像匹配成果品質指標，於本計畫計畫中設定匹配像對點之方均根為 1公尺(即是20個pix)，同時做為是否進行影像改正之門檻依據。

$$\Delta L = \sqrt{(X_i - x_i)^2 + (Y_i - y_i)^2} \quad (38)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta L_i - \bar{\Delta L})^2}{n}} \quad (39)$$

其中， (x_i, y_i) 為UAV影像像上特徵點坐標、 (X_i, Y_i) 為正射影像上特徵點坐標、 i 為特徵點編號、 n 為特徵點總數量，示意圖如圖 10.11。

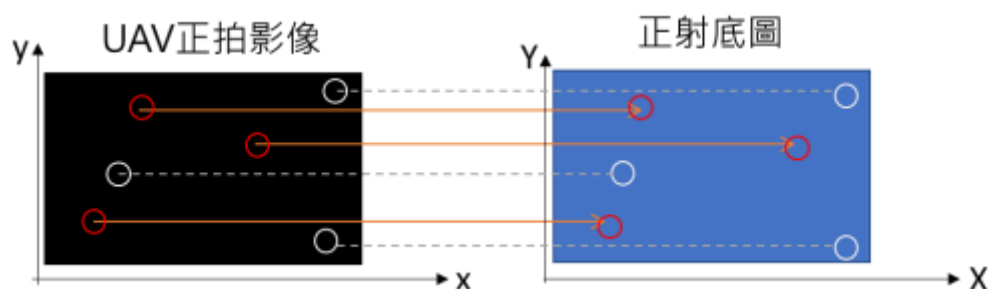


圖 10.11 影像匹配示意圖

10.2.4 正射影像幾何精度檢核

關於正射影像的定位精度，須經由現地特徵明顯之物件進行實際量測與檢核，本計畫挑選了幾個特徵明顯的物件進行檢核，首先選擇為長榮海運40呎標準貨櫃(圖 10.12)，在港區貨櫃中較容易辨認，尤其貨櫃方正的特性，特徵相當明顯。此外在長榮海運的貨櫃中，分為20呎、40呎以及45呎，而40呎這個尺寸為最多，且在影像上不易與其他長榮貨櫃辨識錯誤。



圖 10.12 正射影像檢核用貨櫃圖

在長榮海運的官網也提供了詳細的數據，如圖 10.13所示，顯示貨櫃外觀之長度為12.192m，寬度為2.438m，高度為2.591m，提供了精準的尺寸，因此相當適合用來檢核。

四十呎鋼製乾貨貨櫃

外部尺寸				
長	寬	高		
40'-0"	8'-0"	8'-6"		
12.192 m	2.438 m	2.591 m		
內部尺寸			櫃門內徑	
長	寬	高		
39'-5 45/64"	7'-8 19/32"	7'-9 57/64"		
12.032 m	2.352 m	2.385 m		
重量限制			內容積 (立方米)	
總重	空櫃重	貨物淨重		
67,200 lb	8,020 lb	58,380 lb		
30,480 kg	4,000 kg	26,480 kg		
附註			內容積 (立方米)	
上述資料僅供參考，實際尺寸及重量應以各櫃體標所標示者為準。			67.5	2.385

圖 10.13 長榮海運貨櫃尺寸表(來源:長榮海運官網)

第二個檢核物件選用的為斑馬線(圖 10.14)，斑馬線的特徵與地面有高反差對比，因此特別容易辨別。在此尺寸方面，現階段臺灣各路口根據交通部、內政部一道路交通標誌標線號誌設置規則第 185 條：枕木紋行人穿越道線（斑馬線），設於交岔路口；其線型為枕木紋白色實線，線段長度以3公尺至8公尺為度，寬度為40公分。本計畫將斑馬線寬度列為檢核目標。第三個檢核物件選用雙白線(圖 10.14)，依據道路交通標誌標線號誌設置規則第 158 條:本標線為雙白虛線，線段長4公尺，間距6公尺，線寬10公分，間隔10公分。得知雙白線整體寬度為30公分，本計畫將雙白線整體寬度列為檢核目標。

整體檢核分布位置如圖 10.15所示，均勻分布於測區，斑馬線共計10處，雙白線共計10處，貨櫃共計30個。此外，貨櫃不同於地面標線，是有不同高度變化的，可能會有些微高差位移的影響，故取樣較多。

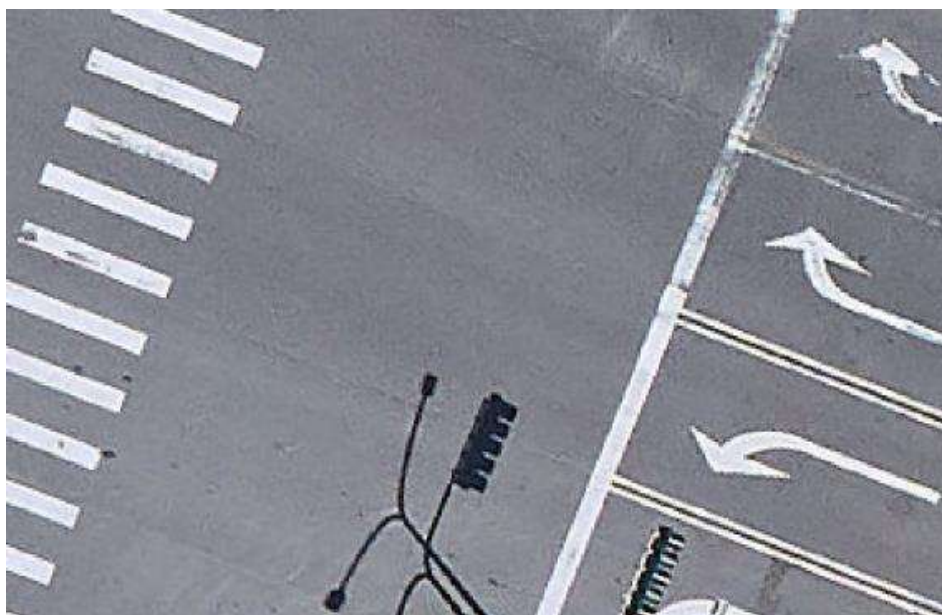


圖 10.14 正射影像港區斑馬線與雙白線圖

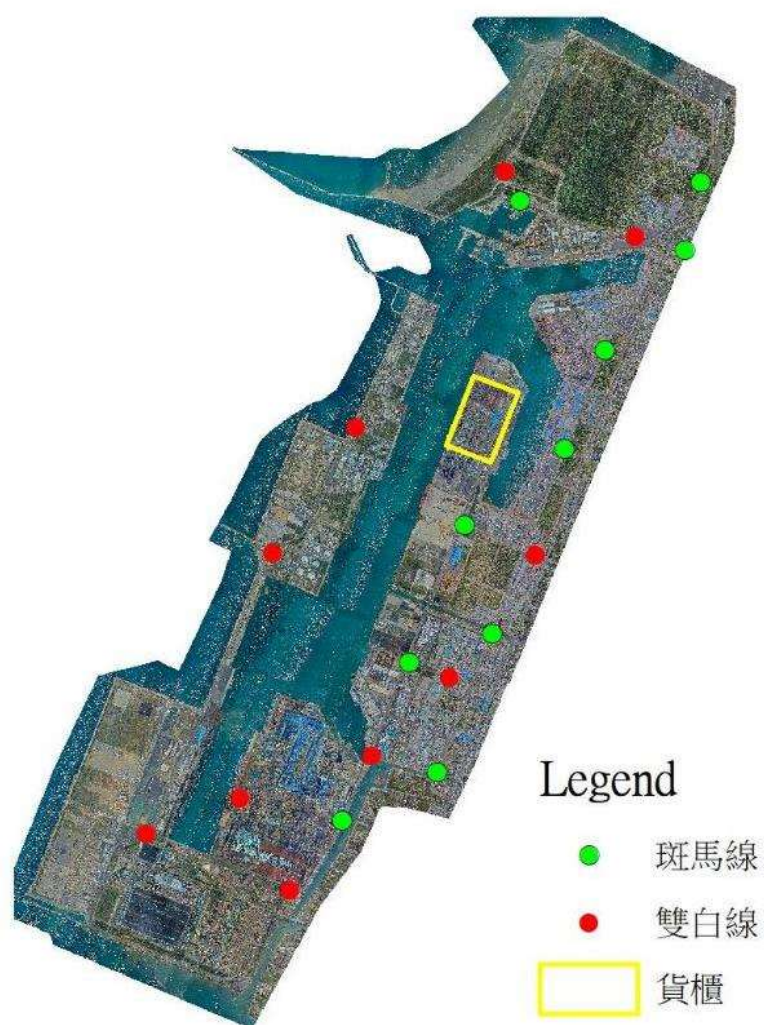


圖 10.15 正射影像檢核物件位置分布圖

貨櫃實際長度為12.192m，表 10-8顯示30筆量測的成果，最大誤差0.157m，最小誤差-0.145m，均方根誤差±0.074m。斑馬線實際寬度為0.40m，表 10-9最大誤差0.045m，最小誤差-0.011m，均方根誤差±0.028m。雙白線實際寬度為0.30m，最大誤差0.070m，最小誤差-0.011m，均方根誤差±0.044m(表 10-10)。最後再使用式(40)和差函數計算，得知整體誤差為±0.090m，故解析度5cm的正射影像整體約為±1.8個像素誤差。

$$\sigma_F = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \quad (40)$$

表 10-8 貨櫃影像尺寸檢核表

數量	量測值 (m)	誤差值 (m)	數量	量測值 (m)	誤差值 (m)
1	12.112	-0.08	16	12.166	-0.026
2	12.349	0.157	17	12.278	0.086
3	12.216	0.024	18	12.123	-0.069
4	12.221	0.029	19	12.198	0.006
5	12.217	0.025	20	12.163	-0.029
6	12.281	0.089	21	12.204	0.012
7	12.263	0.071	22	12.149	-0.043
8	12.235	0.043	23	12.131	-0.061
9	12.121	-0.071	24	12.233	0.041
10	12.047	-0.145	25	12.285	0.093
11	12.206	0.014	26	12.249	0.057
12	12.168	-0.024	27	12.266	0.074
13	12.057	-0.135	28	12.301	0.109
14	12.197	0.005	29	12.063	-0.129
15	12.102	-0.09	30	12.187	-0.005
誤差值 RMSE=±0.074m					

表 10-9 斑馬線影像尺寸檢核表

數量	量測值 (m)	誤差值 (m)	數量	量測值 (m)	誤差值 (m)
1	0.435	0.035	6	0.42	0.020
2	0.407	0.007	7	0.444	0.044
3	0.412	0.012	8	0.414	0.014
4	0.389	-0.011	9	0.438	0.038
5	0.445	0.045	10	0.424	0.024
誤差值 RMSE=±0.028m					

表 10-10 雙白線影像尺寸檢核表

數量	量測值(m)	誤差值(m)	數量	量測值(m)	誤差值(m)
1	0.361	0.061	6	0.371	0.071
2	0.355	0.055	7	0.338	0.038
3	0.311	0.011	8	0.318	0.018
4	0.354	0.054	9	0.323	0.023
5	0.343	0.043	10	0.328	0.028
誤差值 RMSE=±0.044m					

10.2.5 數值地形模型高程精度檢核

對於數值地形模型高程精度的檢核，本計畫採用全區控制點，檢核對應到該相同位置DSM上的網格高程，如圖10.16所示為控制點的分布位置，再將控制點絕對高程與DSM高程相減可得到差值，接著評估精度。除了絕對高程，本計畫也挑選了尺寸明確的貨櫃，如9.3.1節提及的長榮海運貨櫃，在標準20呎及40呎的貨櫃高度均為2.591m，故有相當多的樣本可挑選。如圖 10.17的方式進行相對高度量測，需挑選擺放在地面的貨櫃，先量測紅色箭頭貨櫃頂部角點，再量測黃色箭頭或對底部角點，最後將高程相減，可得DSM上貨櫃高，接著再比較實際尺寸的貨櫃高，並計算差值。



圖 10.16 港區控制點及檢核用貨櫃分布圖



圖 10.17 貨櫃高度量測示意圖

如表 10-11所示為15個控制點的絕對高程檢核成果，顯示DSM高程最大誤差為0.059m，最小誤差為-0.129m，均方根誤差為 ± 0.050 m。另在貨櫃高度的檢核上，採用30筆量測資料，檢核成果如表 10-12所示，最大誤差為0.319m，最小誤差為-0.281m，均方根誤差 ± 0.145 m，再透過式(17)和差函數計算兩個檢核方式的整體誤差為 ± 0.153 m，表示本計畫的DSM模型高程精度可達 ± 0.153 m，誤差約為平面精度的1.6倍，故為合理。

表 10-11 臺中港區 DSM 絕對高程檢核表

點號	控制點正高	DSM 正高	誤差值
TACH	15.041	15.100	0.059
TP01	5.168	5.198	0.030
TP02	4.803	4.835	0.032
TP04	3.523	3.566	0.043
TP05	4.292	4.333	0.041
TP06	4.481	4.531	0.050
TP07	5.095	4.966	-0.129
TP08	5.282	5.338	0.056
TP09	5.203	5.254	0.051
TP10	5.810	5.846	0.036
TP11	5.381	5.404	0.023
TP12	10.947	10.968	0.021
TP13	4.557	4.582	0.025
TP14	4.275	4.299	0.024
TP15	5.436	5.492	0.056
TP16	4.795	4.810	0.015
誤差值 RMSE(m)= ± 0.050 m			

表 10-12 臺中港區 DSM 貨櫃高度檢核表

數量	量測值 (m)	誤差值 (m)	數量	量測值 (m)	誤差值 (m)
1	2.640	0.049	16	2.733	0.142
2	2.510	-0.081	17	2.688	0.097
3	2.550	-0.041	18	2.695	0.104
4	2.390	-0.201	19	2.685	0.094
5	2.910	0.319	20	2.735	0.144
6	2.310	-0.281	21	2.653	0.062
7	2.570	-0.021	22	2.687	0.096
8	2.520	-0.071	23	2.676	0.085
9	2.900	0.309	24	2.684	0.093
10	2.670	0.079	25	2.668	0.077
11	2.740	0.149	26	2.657	0.066
12	2.720	0.129	27	2.451	-0.140
13	2.800	0.209	28	2.700	0.109
14	2.760	0.169	29	2.690	0.099
15	2.767	0.176	30	2.580	-0.011
RMSE=±0.145m					

10.3 取像邏輯規劃測試

10.3.1 無人機航線規劃實際飛行測試

4.3.5節已在安全環境之校園環境下完成航線規劃實測任務，接下來須能實際應用於港區執行任務。本計畫選定臺中港北堤路為測試情境，測試日期為2022/10/15，主要進行道路巡檢，包含拍攝道路裂縫與蒐集路燈影像資料。如圖 10.18所示，為實際拍攝任務內容，圖 10.19為實際飛行拍攝畫面。



圖 10.18 實際飛行測試拍攝內容

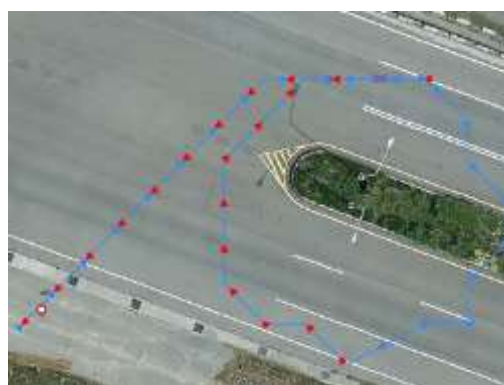


圖 10.19 (a)無人機測試起飛地點(b)無人機實際飛行畫面

實際飛行測試包含了三個任務，第一個任務為單點環飛，如圖 10.20(a)所示在平台規劃的航線共計26個航點，此航線目的在拍攝路燈。最後再匯入Mission Planner進行檢核(圖 10.20(b))，最後確認航線規劃檔之各項參數正確無誤(圖 10.21)。第二個任務為多點巡航，如圖 10.22(a)所示在平台規劃的航線共計49個航點，此航線目的在拍攝道路上感興趣之物件，例如道路裂縫。再匯入Mission Planner進行檢核(圖 10.22(b))，確認航線規劃檔參數正確無誤(圖 10.23)。最後一個任務為地形測繪，如圖 10.24(a)所示在平台規劃的航線共計60個航點，此航線目的在建置完整正射影像。再匯入Mission Planner進行檢核(圖 10.24(b))，確認航線規劃檔參數正確無誤(圖 10.25)。三個任務之詳細飛行參數如表 10-13所示。

表 10-13 測試飛行參數

飛行參數	單點環飛	多點巡航	地形測繪
飛行航高	8m	8m	8m
飛行速度	2m/s	3m/s	5m/s
航點數量	26 點	49 點	60 點
飛行時間	90 秒	105 秒	120 秒
鏡頭俯仰角	45 度	90 度	90 度
當天平均風速	13m/s~16m/s(6 級~7 級)		
當天風向	東北風		



(a)



(b)

圖 10.20 (a)單點環飛平台規畫飛路徑 (b) Mission Planner 檢核飛行路徑

1	QGC WPL 110											
2	0	0	3	16	0	0	0	0	24.298599	120.522472	8	1
3	1	0	3	16	0	0	0	0	24.298626	120.522502	8	1
4	2	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522531	8	1
5	3	0	3	16	0	0	0	0	24.298681	120.522561	8	1
6	4	0	3	16	0	0	0	0	24.298708	120.52259	8	1
7	5	0	3	16	0	0	0	0	24.298735	120.52262	8	1
8	6	0	3	16	0	0	0	0	24.298762	120.522649	8	1
9	7	0	3	16	0	0	0	0	24.298762	120.522679	8	1
10	8	0	3	16	0	0	0	0	24.298762	120.522708	8	1
11	9	0	3	16	0	0	0	0	24.298762	120.522738	8	1
12	10	0	3	16	0	0	0	0	24.298763	120.522767	8	1
13	11	0	3	16	0	0	0	0	24.298762	120.522708	8	1
14	12	0	3	16	0	0	0	0	24.298763	120.522767	8	1
15	13	0	3	16	0	0	0	0	24.298736	120.522797	8	1
16	14	0	3	16	0	0	0	0	24.298708	120.522797	8	1
17	15	0	3	16	0	0	0	0	24.298681	120.522827	8	1
18	16	0	3	16	0	0	0	0	24.298654	120.522827	8	1
19	17	0	3	16	0	0	0	0	24.298627	120.522797	8	1

圖 10.21 單點環飛 Mavlink 檔

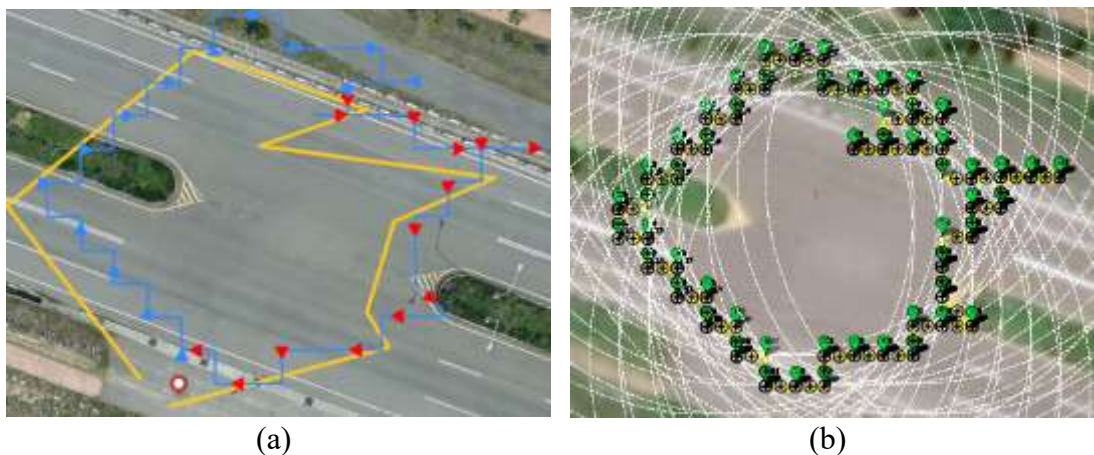


圖 10.22 (a)多點巡航平台規畫飛路徑 (b) Mission Planner 檢核飛行路徑

1	QGC	WPL	110									
2	0	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
3	1	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
4	2	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
5	3	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
6	4	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
7	5	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
8	6	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
9	7	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
10	8	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
11	9	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
12	10	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
13	11	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
14	12	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
15	13	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
16	14	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1
17	15	0	3	16	0	0	0	0	24.298653	120.522443	8	1

圖 10.23 多點巡航 Mavlink 檔

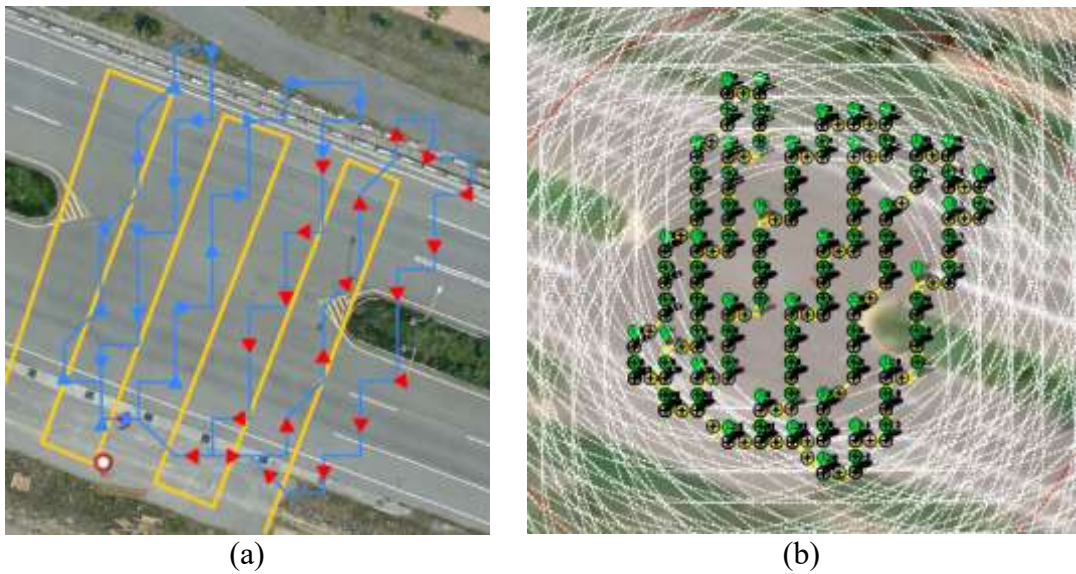


圖 10.24 (a)地形測繪平台規畫飛路徑 (b) Mission Planner 檢核飛行路徑

1	QGC WPL 110												
2	0	1	0	16	0	0	0	0	24.2985990	120.5224720	0.000000	1	
3	1	0	3	16	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	24.29869910	120.52243620	20.000000	1	
4	2	0	3	16	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	24.29839720	120.52337630	20.000000	1	
5	3	0	3	16	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	24.29832390	120.52334550	20.000000	1	
6	4	0	3	16	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	24.29863190	120.52241880	20.000000	1	
7	5	0	3	16	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	24.29856710	120.52239190	20.000000	1	
8	6	0	3	16	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	24.29827380	120.52331190	20.000000	1	
9	7	0	3	16	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	24.29821880	120.52329180	20.000000	1	
10	8	0	3	16	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	24.29849990	120.52237450	20.000000	1	
11													

圖 10.25 地形測繪 Mavlink 檔

10.3.2 無人機跟隨實際飛行

無人機跟隨實際飛行測試成果如4.4.2.節所示，本節歸納測試成果統整如表 10-14。在CASE1跟隨人的情境下，為較簡易的條件，無人機在整段50公尺內的距離，能維持與發報器的距離以及飛行速度不變。確定在跟隨人的模式沒問題後，並進行CASE2測試，測試內容為跟隨車的成果，將車子速度、航高以及無人機飛行速度進行提升，測試無人機的穩定性。根據成果所示，跟隨距離皆能維持不變，但當天受到強烈側風(10 m/s~13m/s)影響，無人機雖能穩定前進，但會產生水平位移。

表 10-14 測試情境統整表

測試情境	CASE1-跟隨人	CASE2-跟隨車
速度	1 km/hr~2 km/hr	5 km/hr~10 km/hr
航高	15 公尺	20 公尺
發報器距離	20 公尺	20 公尺
飛行速度	約 2 km/hr	約 10 km/hr
跟隨總距離	50 公尺	100 公尺
當天平均風速	10 m/s~13m/s(5~6 級風)	
當天風向	東北風	

10.3.3 無人機路徑正確性檢核

(1) 自動航線規劃檢核

本節將驗證無人機在自動航線規劃下之路徑準確行，準確的飛行路徑將對於飛行安全以及任務執行有進一步之提升。檢核方法以水平誤差為原則，以規劃的Waypoints為基準，檢核飛行之Waypoints

的誤差，若誤差越小則表示越精準，反之亦然。在檢核測試中，一共檢核三種任務飛行模式，包括單點環飛(26航點)、多點巡航(49航點)、地形測繪(60航點)。檢核如圖 10.26至圖 10.28所示，可看出每一個航點的差值。此外，表 10-15顯示誤差統計表，單點環飛的均方根誤差為 ± 0.99 公尺，多點巡航的均方根誤差為 ± 1.16 公尺，地形測繪的均方根誤差為 ± 1.06 公尺，整體誤差大約在1公尺左右。

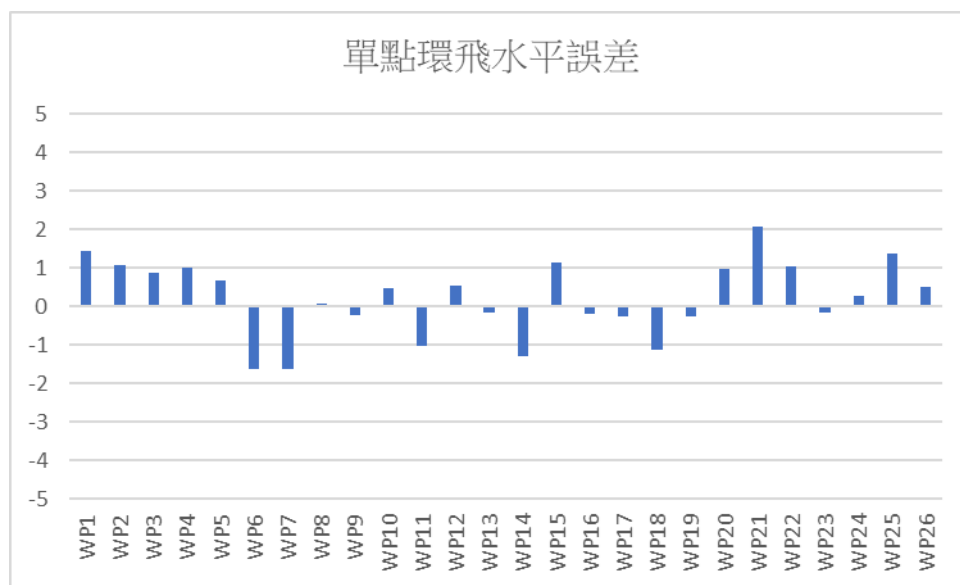


圖 10.26 單點環飛路徑水平誤差

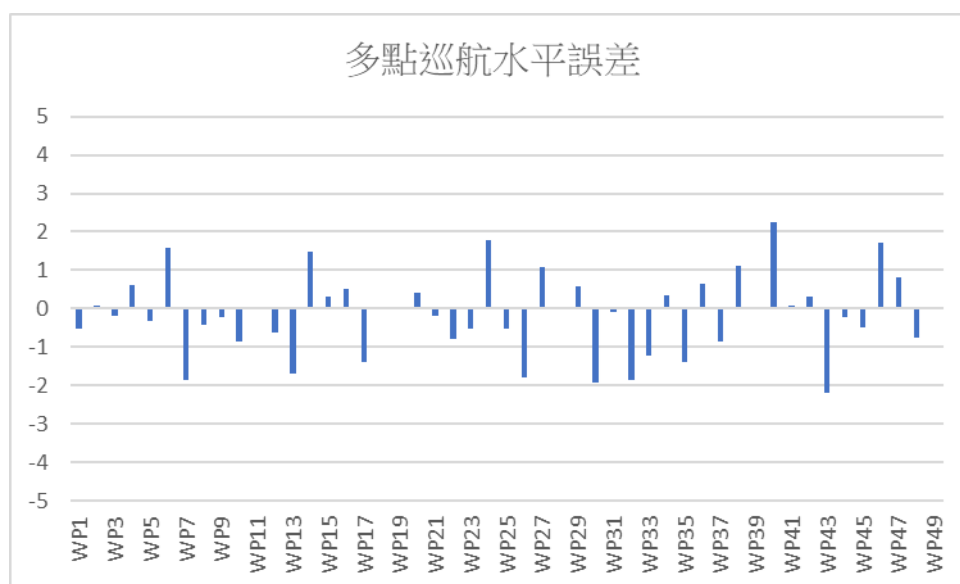


圖 10.27 多點巡航路徑水平誤差

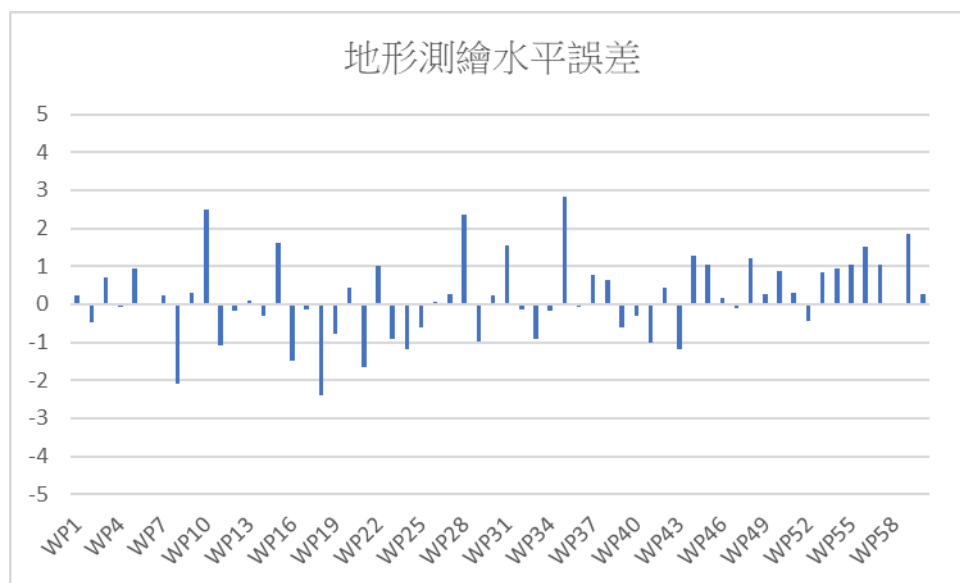


圖 10.28 地形測繪路徑水平誤差

表 10-15 誤差統計表

項目	單點環飛	多點巡航	地形測繪
最大差值	2.09	2.26	2.84
最小差值	-1.64	-2.19	-2.40
平均差值	0.22	-0.15	0.18
差值標準差	± 0.97	± 1.02	± 1.05
差值均方根誤差 (RMSE)	± 0.99	± 1.16	± 1.06

本計畫的無人機衛星定位系統是搭載單點定位之接收設備，並無進行即時動態差分解算，故整體誤差約在1公尺左右，屬於合理範圍。然而，在表 10-15中仍可見到最大差值或最小差值會達到2公尺左右，推測原因是受到2022/10/15當天港區強烈陣風達20m/s之緣故，因此無人機部分路徑無法依照規劃路徑前進，造成位移。排除強烈陣風之因素，本計畫之無人機自動規劃路徑應能符合大部分環境使用情境。

(2) 跟隨無人機檢核

現階段跟隨無人機還在開發中，尚未有無人機之飛行紀錄功能，故無數據化之成果分析。依據跟隨無人機目前的測試成果而言，在前後方向能維持穩定跟隨距離。但在左右方向會受到港區陣風的影響造成偏移(圖 10.29)，經影像量測最大偏移距離約為7m。後續在跟

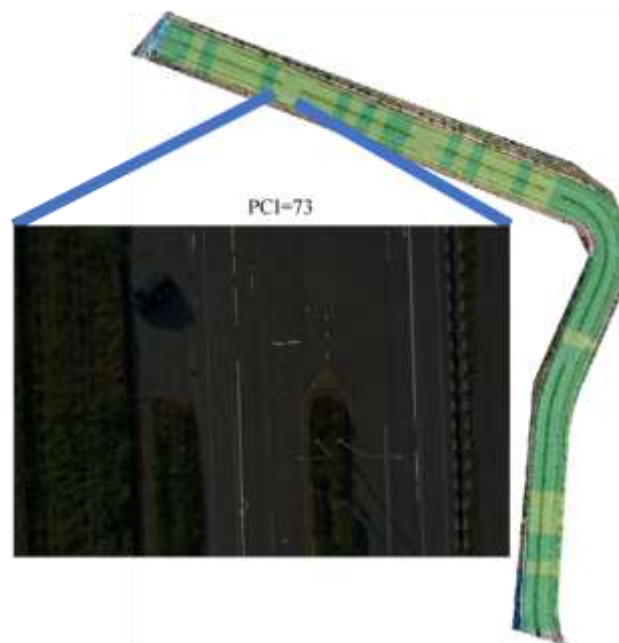
隨位移校正的部分仍是一個可持續精進之項目。



圖 10.29 跟隨無人機側向位移

10.4 PCI 結果之合理性檢核

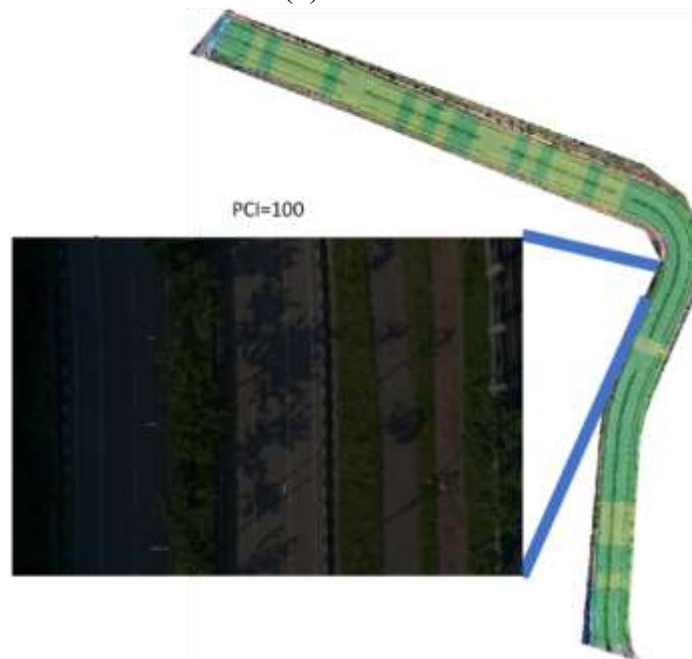
本節將根據PCI結果隨機選取3路段(圖 10.30)進行成果檢核，其PCI值分別為73、82及100。



(a)PCI=73



(b) PCI=82



(c) PCI=100

圖 10.30 隨機檢核路段

10.4.1 PCI 計算流程驗證

PCI與路面的裂縫數是成正比關係的，而圖 10.30 (c)的PCI雖然為100，但其實路面上還是有一些小裂縫，只是很少所以最後算出還是100，可見並非值為100即代表沒有裂縫，因此，為了驗證計算之合理性，將圖 10.30分別按7.2之流程做實際推導。

(1) 圖 10.30 (a) 之推導

首先，按照模型預測結果可得到一條介於100cm~120cm的裂縫，每0.2m量一次寬度因此可得到五組寬度分別為1.67cm(輕級)、1.67cm(輕級)、1.77cm(輕級)、2.35cm(中級)、2.0cm(中級)，經分級可知有三段為輕級而中級有兩段，將各級密度總長除以估算區域面積，可得到各級裂縫密度：

$$\text{輕級} : 3 \times 0.2 / (10 \times 20) = 0.003 = 0.3\%$$

$$\text{中級} : 2 \times 0.2 / (10 \times 20) = 0.002 = 0.2\%$$

再把各級密度取log值帶入各級折減值公式：

$$\text{輕級} : d = 1.7 + 4.45 \times \log 0.3 + 5.18 \times (\log 0.3)^2 = 0.79$$

$$\text{中級} : d = 2.1 + 11.51 \times \log 0.2 + 4.93 \times (\log 0.2)^2 = -3.54$$

可得兩者皆低於2因此PCI值為100。

(2) 圖 10.30(b) 之推導

首先，按照模型預測結果分級可知有12小段為輕級，102小段為中級，3小段為重級，將各級密度總長除以估算區域面積，可得到各級裂縫密度：

$$\text{輕級} : 14 \times 0.2 / (10 \times 20) = 0.012 = 1.4\%$$

$$\text{中級} : 109 \times 0.2 / (10 \times 20) = 0.109 = 10.9\%$$

$$\text{重級} : 12 \times 0.2 / (10 \times 20) = 0.012 = 1.2\%$$

再把各級密度取log值帶入各級折減值公式：

$$\text{輕級} : d = 1.7 + 4.45 \times \log 1.4 + 5.18 \times (\log 1.4)^2 = 2.46$$

$$\text{中級} : d = 2.1 + 11.51 \times \log 10.9 + 4.93 \times (\log 10.9)^2 = 19.35$$

$$\text{重級} : d = 8.3 + 14.06 \times \log 1.2 + 12.96 \times (\log 1.2)^2 = 9.49$$

將結果依大小放入修正折減值計算表，並依據式(31)~(37)計算CDV:

表 10-16 修正折減值計算表

修正折減值計算表						
#	折減值			Total	q	CDV
1	19	9	2	30	3	18
2	19	9	2	30	2	9
3	19	2	2	23	1	6

CDV欄內最大值為18，PCI為82。

(3) 圖 10.30(c) 之推導

最後將圖 10.30(c)按7.2之流程做實際推導。首先，按照模型預測結果分級可知有12小段為輕級，102小段為中級，3小段為重級，將各級密度總長除以估算區域面積，可得到各級裂縫密度：

$$\text{輕級} : 41 \times 0.2 / (10 \times 20) = 0.041 = 4.1\%$$

$$\text{中級} : 217 \times 0.2 / (10 \times 20) = 0.217 = 21.7\%$$

$$\text{重級} : 15 \times 0.2 / (10 \times 20) = 0.015 = 1.5\%$$

再把各級密度取log值帶入各級折減值公式：

$$\text{輕級} : d = 1.7 + 4.45 \times \log 4.1 + 5.18 \times (\log 4.1)^2 = 6.37$$

$$\text{中級} : d = 2.1 + 11.51 \times \log 21.7 + 4.93 \times (\log 21.7)^2 = 26.29$$

$$\text{重級} : d = 8.3 + 14.06 \times \log 1.5 + 12.96 \times (\log 1.5)^2 = 11.18$$

將結果依大小放入修正折減值計算表，並依據式(31)~(37)計算CDV:

表 10-17 修正折減值計算表

修正折減值計算表						
#	折減值			Total	q	CDV
1	26	11	6	43	3	27
2	26	11	2	39	2	14
3	26	2	2	30	1	10

CDV欄內最大值為27，PCI為73。

由以上推導可知程式計算無誤。

10.4.2 訓練模型表現

以預測後模型進行人工驗證後，可知程式計算無誤，因此，再進一步由驗證模型表現證明此PCI之正確性，方法如下：

1. 將圖 6~8 之裂縫人工標註出來。
2. 利用該標註成果經程式計算算初期 PCI 並與模型預測結果做比較。

人工標註結果圖 10.31左邊對應到模型預測成果圖(圖 10.31右側)，可以發現圖 10.31(b)的誤差來源來自模型少偵測到一條縱向裂縫，至於圖 10.31(a)與圖 10.31(c)的預測結果於現實大致相符，誤差來源主要來自預測裂縫寬度過大的問題，因此預測出的PCI會大於實際所算。最後的誤差平均可見表 10-18為5.6%。

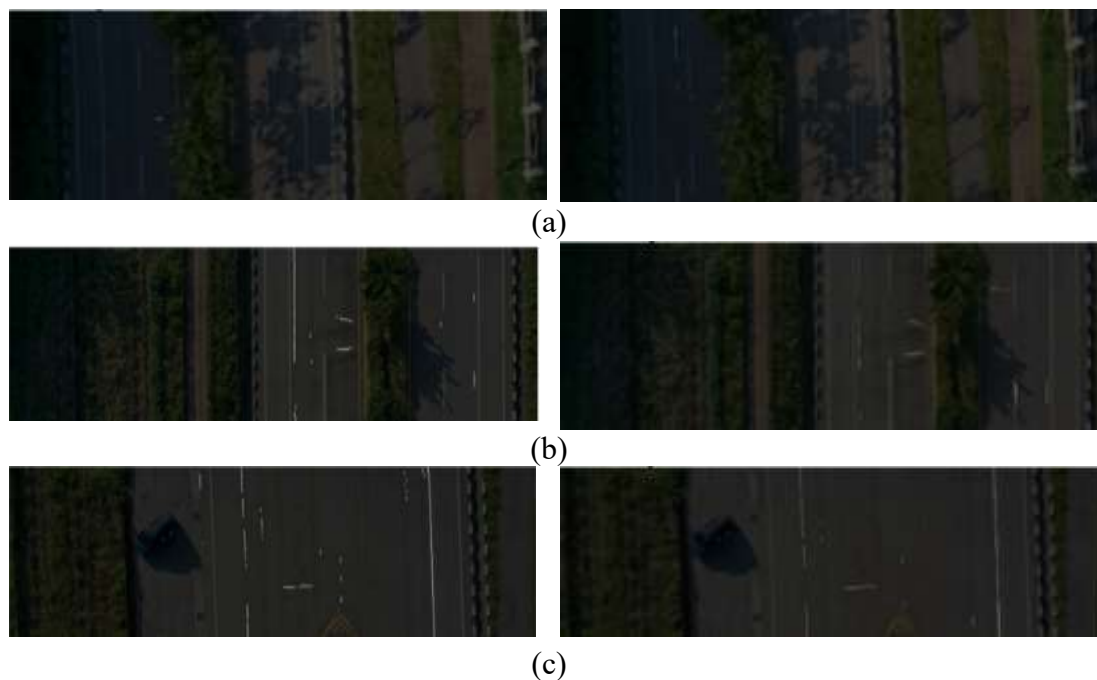


圖 10.31 對照圖 左：人工標註結果 右：模型預測結果

表 10-18 兩模型誤差比較

誤差比較				
	a	b	c	平均
模型計算	100	83	73	85.3
人工標註	92	87	76	85
誤差	8%	4.8%	4.1%	5.6%

第十一章 結論與建議

為建立完善的港區UAV影像管理與分析平台，以降低港區未來在巡檢所需的人力成本，並提高港區構造物管理的效率及處理損壞的即時性。本計畫提出從港區高精度空間資料庫開始建立的概念，藉由定期的影像蒐集，逐步匯入平台中累積樣本數，並結合物件辨識技術，發展出自動化的影像管理平台。

11.1 成果結論

(1) 無人載具與感測系統分析成果：

本計畫蒐集不同種類的無人機並定義各自特性以及飛行性能，再針對酬載能力搭配感測器，並分析港區氣候條件劃分各個區域最適合使用之無人機以及可飛行之月份，提供未來不同飛行任務的最佳依據。

(2) 空間資訊蒐集成果（包含地控點、航拍影像以及三維數值地形模型）：

進行了地面控制點測量與全港區影像資料蒐集，產製出全港區高精度與高解析度之正射影像底圖與數值高程模型，影像上每像素皆具有精確之空間資訊，用來做為後續影像對位依據。同時，針對南堤進行了3期的拍攝，產置三維點雲進行構造物的位移監測比較三個時期的差異性，分別檢測水平及垂直的位移。北防沙堤則為後期才著手進行的部分，雖僅有2期仍可從兩期影像套疊成果，仍可透過比較這兩個時期的差異來展示無人機對於防砂堤監測可發揮的效能。

(3) 飛行載具取像控制邏輯分析：

已完成設計了不同模式下的飛行方法：地形測繪、多點巡航、單點環飛，並闡述了不同方法下所需要的參數設定，也解釋了航線規劃與避障功能所使用的A-star演算法。在取像邏輯部分，說明了影像相關參數的意義與計算方法，能給予後續影像處理應用部分合理的影像參數調配與預期成果檢核，飛行載具取像控制邏輯已分析並

設計出相對應的實作方法，並透過相對坐標與絕對坐標的實際飛行測試，得出最與模擬情況差異最小、最適合應用的坐標系統，對於後續工作有很大的幫助。

在無人機航線規劃的部份，透過安全實驗場地的測試，並設定三個主要的航線任務，皆能依照本計畫所開發之程式進行穩定飛行任務，這也代表無人機之軟硬體設備上能順利溝通並無產生任何錯誤。在無人機跟隨的部分，透過兩個案例之實測，無人機能穩定跟隨人與跟隨車輛飛行，並且能維持固定航高與固定跟隨距離。但在風速較大的港區環境，跟隨仍時會造成水平位移之效應，這是未來仍可持續精進之部分。

(4) UAV影像變遷辨識技術與成果：

應用無人機搭載相機於港區進行影像拍攝，透過影像蒐集記錄區域環境與監測目標，對於全區域影像可依時序重疊影像，基於攝影測量、立體視覺、衛星定位及光束法平差等原理解算分析獲得港區正射影像、數值高程模型等空間資訊。局部關注區域如：中南突堤、中碼頭、北防沙洲堤等攸關海港交通及海岸保護等設施，透過無人機以垂直地面或傾斜拍攝，計畫執行期間已完成該區域多時性影像資料，而龐大影像資訊透過研擬分析流程以影像定位為基礎，基於POI點位位址收納各時序影像。此外，為提供操作者方便比對各時期影像之差異，以基期參考影像(無人機影像或正射影像)透過影像匹配與仿射改正達到影像轉正目的，同時提供方均根RMS指標做為匹配品質評估，當兩期影像滿足匹配品質評估，後期的無人機影像將進行仿射改正，轉正影像收錄並顯示於POI當中；若無達到評估門檻時，則以原影像資訊收納於POI點位中。

(5) 岸邊設施物件偵測技術與成果：

透過語意分割找出感興趣區域，僅將感興趣區域進行實例分割，減少UAV影像中不必要的資訊後，能有效提升辨識成果，達到九成多的辨識精確度，惟碰墊受海水遮蔽影響，每次於影像中的成像變

化較大，辨識效果僅五成多。未來將進一步增加更多受不同潮位線遮蔽的碰墊樣本與驗證樣本來強化目前的模型。

(6) 北堤路物件偵測技術與成果：

在道路設施與道路標線的辨識上，透過物件偵測可以找出道路上路燈、紅綠燈與人手孔蓋的位置，雖然模型的辨識效能僅有八成左右的準確度，但由於UAV拍攝時是連續拍攝，透過物點核算，即便單一照片沒有辨識出設施，但連續照片中只要有一張照片有成功辨識即可算為被模型偵測到，因此整條北堤路上的設施都能被有效偵測出來。道路標線透過切分照片能有效的偵測出整條路上的標線位置與輪廓，透過輪廓可統計整條北堤路上標線的缺損情況，提供是否需要進行道路維護明確的量化指標。

(7) 整合型圖台：

匯入全區正射底圖，除了建構影像量測、各式圖層檢視套疊之外，也整合巡檢及影像自動匹配功能，以10公尺為依據設立POI，影像將根據其坐標匯入相對應的POI，不同時期的POI影像將進行匹配，供使用者分析比對，完成一個可針對不同巡檢任務執行對應飛行模式進行取像及自動化辨識的平台。

(8) 品質評估與行動依據：

統整本計畫各項分析流程與軟硬體配置，判定各階段關鍵因子並評估成果。無人機方面將以飛行範圍、作業時間、飛行穩定性、飛行機動性為主；無人機航高與重疊率部分則以影像解析度、影像範圍、影像匹配品質為主；取像邏輯規劃則以無人機模擬路徑與實際路徑的差異為考量；最後，物件辨識及偵測會參考特徵點、拍攝影像定位資訊。這些成果將做為港區無人機管理與應用之參考依據。

11.2 後續建議

(1) 岸邊設施物件物件偵測技術與成果：

目前影像取像方式，雖已能成功偵測大部分物件，但不同潮位

所拍攝影像會有海水遮蔽導致偵測失敗的可能性，未來應針對欲偵測設施大小以及所需精度，固定於較低潮位進行拍攝，並彈性調整取像方式以確保各設施能於影像中被清楚辨識與偵測。

(2) 影像匹配：

本計畫利用影像地理定位、匹配結合仿射改正，有效輔助使用者針對關注區域點位快速比對多時期影像，此外，本計畫亦針對港區物件如碰墊、繫繩(纜)柱、反光板等構造物進行辨識，後續研究計畫將可基於這些辨識物件做為基礎參考，在物件匹配過程中亦可同時針對是否匹配成功做為物件清查演算方針，預期將能針對港區物件管理提供更節人力之調查效益。

(3) 系統發展：

本計畫開發建立2D電子地圖圖台，做為資料展示介面，未來可視需求介接其他單位提供之WMS/WMTS標準化資料內容於平台之上，增加資料豐富程度，輔助使用者進行港區及周遭位置狀態之理解及判斷，此外應將本計畫所發展之自動化物件辨識技術功能，納入未來擴充功能的模組之一，使之達到更細緻的影像管理與應用效能。

(4) 巡檢影像拍攝：

關於港區巡檢建議使用2公斤以下之Type 2或2公斤以上未達15公斤之多旋翼無人機，方便於港區機動巡檢。應用在大範圍的港區正射或地形產製，建議使用定翼機執行，能有較長之巡航時間，且飛行更為穩定。關於無人機巡檢天氣，進行巡檢時建議現場最大風速不應超過3級風(5.4m/s)，以維持無人機最佳狀態。另針對無人機巡檢拍攝，相機拍攝角度與航高位置，建議不同時期應為一致的拍攝方法是較良好的方式，由於影像尺度與比例一致，在進行影像匹配時，能增加特徵點被匹配成功的機率。

(5) 系統平台可應用與部分可應用：

目前系統平台可應用的部分為UAV巡檢影像的自動POI匹配與航線規劃，航線規劃後之檔案需匯入missionplanner中，透過missionplanner開源平台與自組無人機的飛控系統溝通，始能進行自動化飛行。

部分可應用的部分為岸邊設施的辨識，巡檢之UAV影像可自動化進行偵測，偵測後與基期進行比對，惟目前中突堤全岸的比對僅能作用於POI223至POI233之間，做為比對基期的影像需人工進行標註，比對要能適用全中突堤須待全堤區的基期影像完成人工標註後方能進行。

後續可持續增加的部分為將北堤路的設施辨識成果與鋪路損壞程度PCI判斷放置平台之中，使自動化巡檢更加完善。另外完整的岸邊設施編號也有助於自動化巡檢，完善的編號系統能提供異狀設施之編號，加速巡檢人員的查看。

11.3 成果效益與後續應用情形

透過本計畫所建構之平台以及平台內所設計之功能，可使相關操作人員進行自動化的巡檢管理。透過不同飛行模式所執行得到的影像，可進行不同類型的影像匹配，不僅可進行長期性的港區環境監測，更能透過匹配後的成果得知改變之處，並進行政策調整或立即性維護。隨著後續物件辨識功能於平台的加入，使用者可更直覺地將各項巡檢標的進行分類，提升對各項構造物的檢查效率，達到精簡人力同時不影響巡檢品質的效益。

參考文獻

1. Alcantarilla, P. F., and Solutions, T., 2011. Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell*, 34(7), 1281-1298.
2. Ambrosia, V., Buechel, S., Wegener, S., Sullivan, D., Enomoto, F., Hinkley, E., and Zajkowski, T., 2011. Unmanned airborne systems supporting disaster observations: Near-Real-Time data needs. *Int. Soc. Photogramm. Remote Sens*, 144, 1-4.
3. Anderson, S.B., 1981. Historical Overview of V/STOL Aircraft Technology .NASA Technical Memorandum,20p.
4. Bay, H., Tuytelaars, T., and Van Gool, L., 2006. Surf: Speeded up robust features. In *European conference on computer vision* , Graz, Austria, 7 – 13 May 2006, pp. 404-417.
5. Bochkovskiy Alexey, Wang Chien-Yao, Hong-Yuan Mark Liao., 2020, YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection, arXiv preprint arXiv:2004.10934.
6. Bolourian, N., Soltani, M., Albahri, H., and Hammad, A.,2017. High Level Framework for Bridge Inspection Using LiDAR-equipped UAV. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*,34,1-6
7. Cary, L., and Coyne, J., 2012. ICAO Unmanned Aircraft Systems (UAS). 2011-2012UAS Yearbook - UAS: The Global Perspective,112–115.
8. Castillo-Carrión, S., and Guerrero-Ginel, J. E., 2017. SIFT optimization and automation for matching images from multiple temporal sources. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 57, 113-122.
9. Colomina, I., and Molina, P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 92, 79-97.
10. Diganta Misra. Mish: A Self Regularized Non-Monotonic Neural Activation Function.
11. Drury, C. G., Fox, J. G., 1975. The imperfect inspector. In C. G.

- Drury & J. G. Fox (Eds.) Human Reliability in Quality Control, pp. 11–16.
12. Escobar-Wolf, R., Oommen, T., Brooks, C., Dobson, R., Ahlborn, T., 2018. Unmanned aerial vehicle (UAV)-based assessment of concrete bridge deck delamination using thermal and visible camera sensors: a preliminary analysis. *Res Nondestr Eval*, 29(4), 183-198.
 13. Feng, Q., Liu, J., and Gong, J., 2015. Urban flood mapping based on unmanned aerial vehicle remote sensing and random forest classifier—A case of Yuyao, China. *Water*, 7(4), 1437-1455.
 14. Ghiasi Golnaz, Lin Tsung-Yi, V. Le Quoc. 2018, DropBlock: A regularization method for convolutional networks, arXiv preprint arXiv: 1810.12890.
 15. Greenwood, W. W., Lynch P, J., and Zekkos, D., 2019. Applications of UAVs in civil infrastructure. *J. Infrastruct. Syst*, 25 (2).
 16. He Kaiming, Zhang Xiangyu, Ren Shaoqing, Sun Jian., 2015, Spatial Pyramid Pooling in Deep Convolutional Networks for Visual Recognition, arXiv preprint arXiv: 1406.4729.
 17. He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., & Girshick, R. (2017). Mask r-cnn. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* (pp. 2961-2969).
 18. Hearn, D., and Baker, M. P., 1986. *Computer Graphics*, Prentice Hall International, pp. 205-302.
 19. Hu, J.; Lanzon, A., 2018. An innovative tri-rotor drone and associated distributed aerial drone swarm control. *Robotics and Autonomous Systems*, 103, 162–174.
 20. Jau, U. L., Teh, C. S., and Ng, G. W., 2008. A comparison of RGB and HSI color segmentation in real-time video images: A preliminary study on road sign detection. In *2008 International Symposium on Information Technology*, 4, 1-6.
 21. Juan, L., and Gwun, O., 2009. A comparison of sift, pca-sift and surf. *International Journal of Image Processing (IJIP)*, 3(4), 143-152.
 22. Klema, V., & Laub, A. (1980). The singular value decomposition: Its computation and some applications. *IEEE Transactions on automatic control*, 25(2), 164-176.

23. Li, H., Sun, F., Liu, L., and Wang, L., 2015. A novel traffic sign detection method via color segmentation and robust shape matching. *Neurocomputing*, 169, 77-88.
24. Liu, Z., An, J., and Jing, Y., 2011. A simple and robust feature point matching algorithm based on restricted spatial order constraints for aerial image registration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(2), 514-527.
25. Lowe, D. G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2), 91-110.
26. Luo, W., Taylor, M., Parker, S., 2008. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. *International Journal of Climatology*, 28(7), 947-959.
27. Malik, Z., and Siddiqi, I., 2014. Detection and recognition of traffic signs from road scene images. In 2014 12th International Conference on Frontiers of Information Technology, 330-335.
28. Martinez, J. G., Gheisari, M., and Alarcón, L. F. 2020. UAV Integration in Current Construction Safety Planning and Monitoring Processes: Case Study of a High-Rise Building Construction Project in Chile. *Journal of Management in Engineering*, 36(3).
29. Menouar, H., Guvenc, I., Akkaya, K. , Uluagac, A.S., Kadri, A., 2017. Tuncer UAV-enabled intelligent transportation systems for the smart city: Applications and challenges. *IEEE Commun. Mag*, 55 (3), 22-28.
30. Mikhail, E. M., Bethel, J. S., & McGlone, J. C. (2001). *Introduction to modern photogrammetry*. New York, 19.
31. Radoglou-Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Lagkas, T., and Moscholios, I., 2020 .A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Computer Networks*, 172.
32. Rafael Müller, Simon Kornblith, Geoffrey Hinton. 2020, When Does Label Smoothing Help? *Google Brain*,
33. Rosten, E., Porter, R., and Drummond, T., 2008. Faster and better: A machine learning approach to corner detection. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 32(1), 105-119.

34. Schenk, T., 1999. Digital Photogrammetry Volume I, TerraScience, Laurelville, Ohio, USA, pp. 232-295.
35. See, J.E., 2012. Visual Inspection: A Review of the Literature. Sandia National Laboratories.
36. See, J. E., Drury, C. G., Speed, A., Williams, A., Khalandi, N., 2017, September. The Role of Visual Inspection in the 21st Century. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 61, No. 1, pp. 262-266). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
37. Seferbekov, S., Iglovikov, V., Buslaev, A., & Shvets, A. (2018). Feature pyramid network for multi-class land segmentation. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (pp. 272-275).
38. Soheilian, B., Paparoditis, N., and Vallet, B., 2013. Detection and 3D reconstruction of traffic signs from multiple view color images. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 77, 1-20.
39. Shan, Q., Wu, C., Curless, B., Furukawa, Y., Hernandez, C., and Seitz, S. M., 2014. Accurate geo-registration by ground-to-aerial image matching. In 2014 2nd International Conference on 3D Vision, 1, 525-532.
40. Sun, P., Wu, Z., Zhang, Y., & Wu, J. (2021, November). A Novel Assessment Method of Cracks Width Quantitative Model Based on Computer Vision. In 2021 17th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS) (pp. 314-317). IEEE.
41. Tan, Y., and Li, Y., 2019. UAV Photogrammetry-based 3D road distress detection ISPRS Int. J. Geo-Inf., 8 (9), 409
42. Tice, B., 1991. Unmanned Aerial Vehicles – The Force Multiplier of the 1990s . Airpower Journal,5(1).
43. Tsai, C. H., and Lin, Y. C., 2017. An accelerated image matching technique for UAV orthoimage registration. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 128, 130-145.
44. Wang, C. Y., Liao, H. Y. M., Wu, Y. H., Chen, P. Y., Hsieh, J. W., & Yeh, I. H. (2020). CSPNet: A new backbone that can enhance learning capability of CNN. In Proceedings of the IEEE/CVF

- conference on computer vision and pattern recognition workshops (pp. 390-391).
45. Yang, Z., 2010. Fast template matching based on normalized cross correlation with centroid bounding. In 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2, 224-227.
 46. Ye, Y., Shen, L., Hao, M., Wang, J., and Xu, Z., 2017. Robust optical-to-SAR image matching based on shape properties. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(4), 564-568.
 47. Yeh, F.S., Huang, C. J., Han, J.Y and Ge, L., 2018. Modeling Slope Topography Using Unmanned Aerial Vehicle Image Technique, The Third International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment, Bandung, Indonesia, 147.
 48. Yiming Fang, Xianxin Guo, Kun Chen, Zhu Zhou, Qing Ye. Accurate and Automated Detection of Surface Knots on Sawn Timbers Using YOLO-V5 Model. *BioResources*. 2021;16(3):5390-5406. Accessed October 23, 2022.
 49. Yun Sangdoo et al., 2019, CutMix: Regularization Strategy to Train Strong Classifiers with Localizable Features, arXiv preprint arXiv: 1905.04899v2.
 50. Zhuo, X., Koch, T., Kurz, F., Fraundorfer, F., and Reinartz, P., 2017. Automatic UAV image geo-registration by matching UAV images to georeferenced image data. *Remote Sensing*, 9(4), 376.
 51. Zhang, W., Li, X., Yu, J., Kumar, M., and Mao, Y., 2018. Remote sensing image mosaic technology based on SURF algorithm in agriculture. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018(1), 1-9.
 52. Zhao, J., Zhang, X., Gao, C., Qiu, X., Tian, Y., Zhu, Y., and Cao, W., 2019. Rapid mosaicking of unmanned aerial vehicle (UAV) images for crop growth monitoring using the SIFT algorithm. *Remote Sensing*, 11(10), 1226.

附錄一、UAV於港區設施巡檢可行性評估表

表 附-1 UAV 於港區設施巡檢可行性評估表

無人機巡檢項目		可行性
道路、橋梁及其附屬設施	道路鋪面	可△
	橋梁	可△
	標誌	可△
	標線	可△
	號誌	可
	交通島	可△
	照明設施	可
	護欄	可△
	碰撞緩衝設施	可△
	排水溝渠	可△
	排水孔及人手孔蓋	視現場情況
繫船設施	碼頭面	可△
	冠牆	可△
	車檔	可
	繫船柱	可△
	防舷材	可△
	排水溝渠	可
	排水孔	視現場情況
	人手孔蓋	視現場情況
	軌道	可△
	附屬設施	可
防波堤、海堤、護岸	堤面	可△
	胸牆	可△
	接縫	可△
	消波塊	可△
高壓變電站設備	高低壓電器設備	視現場情況
	電器室	視現場情況

*所有巡檢項目皆需在無人機能可視情況下才得以執行

△若目標小於現有拍攝解析度則無法執行

附錄二、UAV巡航模式拍攝說明

(1) 多點巡航

多點巡航，本計畫以北防砂堤之構造物為案例，如圖1所示，本計畫採用多點巡航模式，沿著構造物進行航線規劃拍攝。其操作步驟如下說明：

1. 航高設定: 60m
2. 鏡頭角度(飛機姿態): 面對目標物俯角90度
3. 設定拍照間隔: 10m一張
4. 設定飛行速度: 5m/s~7m/s



圖 1 北防砂堤構造物多點巡航 POI 圖

(2) 單點環飛

單點環飛，本計畫以北堤進港航道後導標為案例，如圖2所示，本計畫採用單點環飛模式，沿著構造物進行航線規劃拍攝，圖3為不同視角的環飛拍攝影像，其操作步驟如下說明：

1. 設定目標物中心：圓心
2. 設定環飛高度：70m~80m
3. 設定環飛半徑：60m~70m
4. 鏡頭角度(飛機姿態)：面對目標物俯角40~50度
5. 設定拍照間隔：10~15m一張
6. 設定飛行速度：5m/s~7m/s



圖 2 北堤進港航道後導標單點環飛 POI 圖



圖 3 單點環飛不同視角影像

(3) 地形測繪

地形測繪，本計畫以北防砂堤全區為案例，如圖4所示，本計畫採用地形測繪模式，規劃不同區塊航線進行拍攝。其操作步驟如下說明：

1. 航高: 100m~120m
2. 鏡頭角度: 鏡頭俯角90度
3. 前後左右重疊: 60%以上
4. 飛行速度10m/s~12m/s
5. 潮位接近0m時拍攝



圖 4 北防砂堤地形測繪 POI 圖

附錄三、管理平台功能頁面



圖 1 平台主頁



圖 2 平台圖層列表



(a)



(b)



(c)

圖 3 (a)平台航線規劃功能頁面 (b)航線規劃參數頁面 (c)查詢實際飛行參數結果



(a)



(b)

圖 4 (a)直線距離量測 (b)面積量測

附錄四、無人機申請流程

如圖1所示，若政府機關或法人單位需進行無人機飛航作業，需透過民航局第一階段能力審查後，才可進行飛航活動。飛航活動範圍若屬於地方政府公告區域，則需向地方政府申請，若屬於禁限航區及機場四周，以及需要排除限制操作，則向民航局申請。完成申請後每一次飛行任務皆需至民航局官網報到與報離。另如圖2紅色區域為禁限航區，不得起飛降落，需向民航局申請。綠色區域，除了需排除限制操作外，120m以下空域不需向民航局申請。

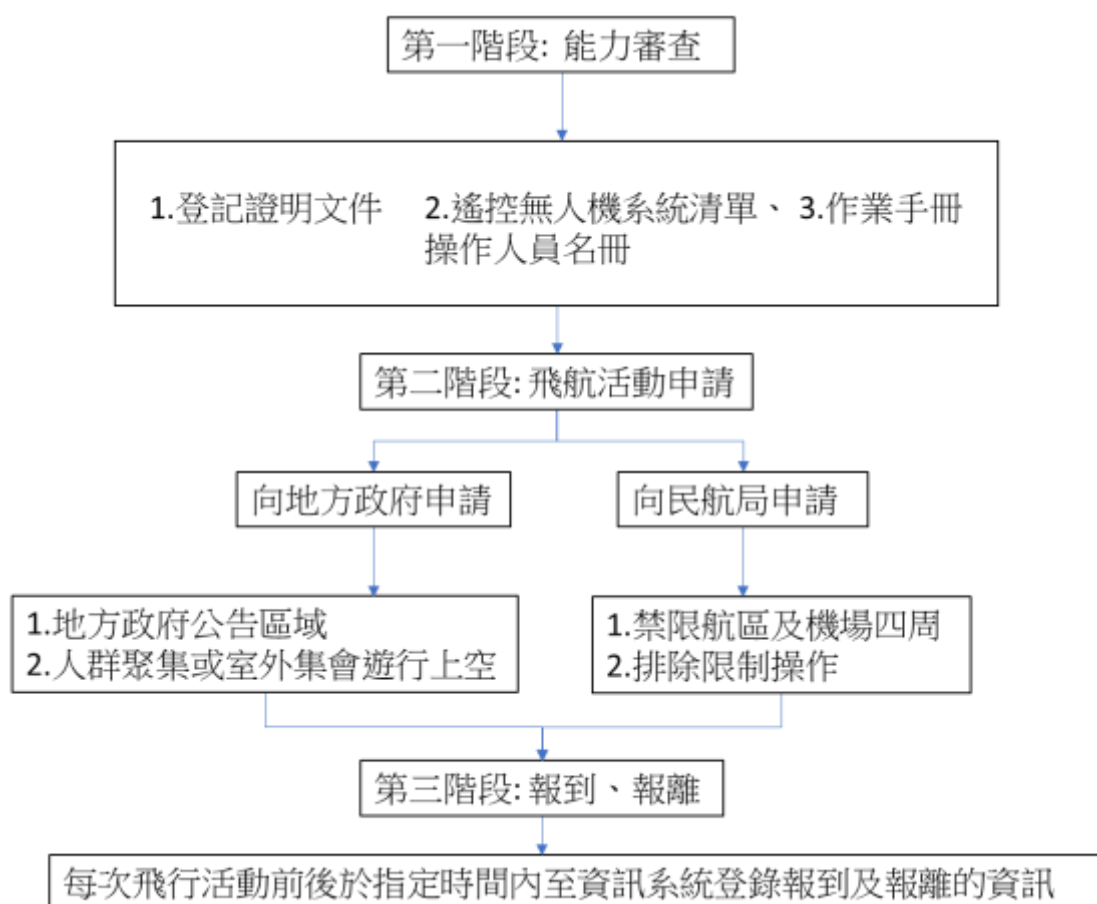


圖 1 無人機飛航申請流程圖



圖 2 臺中港禁航區圖(來源:民航局 Drone Map 2021.11.22 資料)

附錄五、期中審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫(具委託性質)

期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：無人機影像監測技術應用於臺中港區管理之研究(II)-空間資訊整合分析平台建置

合作研究單位：國立臺灣大學

參與審查人員及其 所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
一、余騰鐸委員		
不同掛載是否需要使用不同無人機機型來執行飛航？	本計畫旨在測試 UAV 搭載不同感測器之效能，市面上已有可同時搭載多種感測器之無人機，尤其是光達感測器，需要酬載較大之無人機進行掛載，但目前研究階段仍以個別測試為主。	依處理情形辦理。
不同掛載是否需要由無人機供電，重量差異對於無人機可操作時間影響應加以討論！	感謝委員建議，掛載之耗電度相對於飛機本身飛行所需電量僅佔一小部份，故不同掛載其對操作時間影響不大，後續將於期末報告補充各掛載之耗電量，做為應用時之參考。	所提意見及執行內容調整，列入期末報告辦理。
Mavlink 能否自動指揮無人機在不同 way point 相機指向？	從 Mavlink 的控制檔案中，可以調整相機指向方向。	符合。
沙洲濕度數據是否經過驗證，準確度約為多少？	沙洲外圍有設立多個防波堤，不易進入，目前尚未實際驗證資料。	符合。
4-24, 4-33 出現多次「世界坐標」，是指 UTM 還是 WGS84?	皆使用 WGS84	符合。
5-7 控制點較政，應該是筆誤～	感謝委員建議，已於報告書內進行修正。	所提意見及執行內容調整，列入期末報告辦理。
團隊工作很詳實，建議期末收斂些議題。最好有表單式選擇讓非遙測專業者能快速找出適當組合與飛行參數。	感謝委員建議，目前規劃的平台參數皆為常用預設值，後續將於教育訓練中讓非遙測專業者能快速找出適當組合與飛行參數。	所提意見及執行內容調整，列入期末報告辦理。
二、王聖鐸委員		
依期程規畫及期中報告書所載，執行團隊確實完成 UAV	感謝委員肯定。	符合。

影像之 智慧化分析研究及新式感測器之引入與可應用性研究，達到預期 進度。		
在多光譜感測器中，目前只評估了熱紅外感測器是否可增加評估 其他多光譜感測器，尤其是可用來分析植生的 NIR 波段？其地面 解析度會大幅優於 FLIR 的熱紅外感測器。	感謝委員建議，因感測器費用較昂貴，未來若有較充裕之經費則可嘗試進行。	依處理情形辦理。
P.2-7 圖 2-11 是否有現場照片可做比較？	感謝委員建議，將於期末報告中加入實際影像做為比較。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。
P.3-1 路徑規劃時有匯入 DSM，其設計航線是否可依地形起伏調整攝影站航高，以維持固定比例尺？	感謝委員建議，目前 DSM 於路徑規劃功能中為地形避障警示，可將調整航高做為未來規劃考量。	依處理情形辦理。
P.3-4 throttle 依國教院學術名詞網及航空航海慣用語通常譯為「節流」或「節流閥」，但此處寫通常為 0%，請說明原因為何？	感謝委員的建議，此處為筆誤，應為-1，代表不改變。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。
反光板若因顏色剝落而使辨識率下降，是否可能改用其他幾何特徵來做辨識？或改用灰階影像降低色相差異影響？	感謝委員建議，深度學習在進行辨識時幾何的特徵是會被納入考量的，後續亦會嘗試委員的建議，並進行比較。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。
SIFT 的優點是不受尺度(物體大小)影響，若 SURF 反而受影響，是否回來測試 SIFT 的效果如何？	感謝委員建議，SURF 及 SIFT 所的效果不同，SURF 演算保有 SIFT 演算基本優勢 (ex: 抗尺度變化、移動及轉動)，對於無人機影像存在多視角挑戰，反而 SURF 能優於 SIIFT 執行演算效益。	符合。
P.4-7 中投影轉換用了 9 參數，但平面投影轉換應該是 7 參數。	感謝委員建議，已將 p4-7 方程式 3 由九參數更改為七參數。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。
影像平台建議在每一張影像加入四角坐標，以利提供點選某地面 位置後，可自動顯示所有涵蓋該位置的 UAV 航拍照片。	感謝委員建議，後續將與委辦單位討論與最適合的呈現方法。	依處理情形辦理。

三、江文山委員		
計畫目的簡報中有詳細說明，建議報告中亦補充簡報所說明的目的，以利閱讀。以無人機取代人工巡檢似乎是計畫動機之一，建議說明目前人工巡檢的不足點，而無人機可以改善的部分或是取代的部分。	感謝委員肯定。	相關目的及目前人工巡檢不足之處，已請合作團隊於期末報告補充說明。
巡檢的標的主要是基礎設施、結構等，目前技術上以前後時段的影像比較做為判斷，建議可以港區設施結構設計的資料做為比對基準，會比較精準，例如表4-1若有設計長度更為明確，同時可以分析是否超出設計的容許，進而決定採取的因應措施。	感謝委員建議，已持續向港公司協調相關圖資，若成功取得將可於後續進行相關分析。	依處理情形辦理。
報告對於無人機與相關感測器的技術說明相當詳細，值得參考，應用成果的部分著重在案例展示，當然目前是期中的階段性成果，後續建議在成果的說明可以更多著墨，以利管理應用之需求，亦是計畫名稱的主題。	感謝委員肯定。	符合。
表3-1中敘述無人機的相關技術規格，建議加入無人機環境的抵抗能力，以利了解後續應用上的限制。	感謝委員建議，相關抗風能力已於第一年進行港區環境評估，期末報告中將完整呈現兩年成果。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。
港區畢竟是非常敏感且重要的設施，無人機除了避撞的考量以外，對於其他風險是如何考量請補充說明。	感謝委員建議，團隊所使用之無人機除避障考量外，另設有失控時自動保護與相關人工介入操控機制，以降低意外發生風險。	符合。
沙洲建模部分為了建立北防沙堤沙洲之體積，但期中報告尚未見到該部分成果，含水量部分亦同，請教後續作法為何？	感謝委員建議，期末報告將補充體積計算結果，至於含水量部分現僅能透過溫度去判斷是否需要灑水降低飛沙。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。
目前各種感測器是每次航程各別搭載或是可以同時掛載多種感測器，同時取得多種資訊做為應用？	感謝委員建議，本年度計畫在感測器部分僅為測試應用，若未來經費較充裕則可嘗試進行。	依處理情形辦理。

四、張瑞隆委員		
期末報告建議可以增加前期研究的描述。	感謝委員建議，將於報告內進行文字補充。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。
光達部分建議增加規格表，特別是 POS 部份。	感謝委員建議，將於報告內進行文字補充。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。
UWB 跟隨，有哪些優缺點與限制。	UWB 能在沒有 GPS 訊號的地方持續跟隨，且不受訊號遮蔽或環境光線條件影響，目前主要限制為訊號傳輸距離有一定限制(50-100 公尺)，但應足以運用於一般跟隨巡檢任務。	符合。
簡報中對平台架構描述，可以補充到報告中。	感謝委員建議，將於報告內進行文字補充。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。
五、港研中心蔡立宏主任		
標線以及人孔蓋模型訓練成果，無法辨識缺漏找錯的原因或態樣為何?是否可以再訓練或改善以提升精確率。	感謝委員建議，團隊將持續新增樣本，後續會以 UAV 影像結合實際物點核算來進行辨識，畫質優於前次辨識使用的正射影像，預計辨識效果能進一步提升。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。
熱感影像辨識可以界定植栽範圍，是否可分析茂密或成長狀態(如枯死)?	熱感影像雖無法分析植生茂密程度，但多光譜有機會，未來若有足夠經費可嘗試進行。	依處理情形辦理。
沙灘光學影像建模分析，沙粒含水量是否影響分析結果?	因沙洲建模部分使用光學影像建模，沙粒含水量不會影響分析結果。	符合。
因潮汐影響北淤沙區沙灘範圍，沙灘光學影像拍攝時間，建議可選在大潮乾潮時拍攝，可以得到更大面積範圍之比較。	感謝委員建議，目前基於前一年度委員建議，團隊拍攝時間皆為低潮位零米線時。	符合。
道路鋪面裂縫，可以辨識的解析度為何?	目前以拍攝航高 50 公尺影像為例，所能偵測到的裂縫寬度最細的大約是 0.5 公分。	符合。
六、港研中心李俊穎科		
請補充計畫內所提 UAV 的抗風能力。	感謝委員建議，相關抗風能力已於第一年進行港區氣候環境評	所提意見及執行內容調整,列

	估，期末報告終將完整呈現兩年成果。	入期末報告辦理。
後續建議可再補述前工作會議所建立圖磚匹配流程優化效能部分。	感謝委員建議，將於報告內進行文字補充。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。
建議請補充說明所開發平台所載入多時期影像，是否能收錄其他 UAV 所拍攝影像。	感謝委員建議，平台內影內收入皆利用 POI 點，後續可因應承辦單位需求進行 POI 點位增加，以利收錄其他 UAV 影像。	依處理情形辦理。
報告已將今年度 AI 物件檢測標的物與檢測邏輯進行說明，後續請一併納入補述港區設施部分，以具體呈現整體計畫巡查標的及開發模組功能。	感謝委員建議，將於期末報告列出最終可於系統內進行辨識的項目。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。
後續請說明所開發資訊平台今年度完成後可實務運作部分，並建議製作手冊，說明系統架構、功能及設定，以利後續移轉及人員操作。	感謝委員建議，系統架構、功能及設定部分將於期末報告內進行相關補充。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。
後續請彙整本計畫2年度的整體計畫成果進行說明。	感謝委員建議，將於報告內進行文字補充。	所提意見及執行內容調整,列入期末報告辦理。

附錄六、期末審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫(具委託性質)

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：無人機影像監測技術應用於臺中港區管理之研究(Ⅱ)-

空間資訊整合分析平台建置

合作研究單位：國立臺灣大學

參與審查人員及其 所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
一、江文山委員		
報告中對於無人機應用的文獻回顧，技術發展與相關的應用實例分析說明詳實嚴謹，肯定團隊的努力。	感謝委員肯定。	符合。
計畫目的中提到針對特殊事件(如海面油污)開發分析，目前報告中未提到此部分，這應是更長期的目標，非年度計畫需求，請教後續納入油污分析應用的可能性。	油污分析的感測部分有機會利用熱紅外影像或多光譜儀(影像)來達成，為非本年度計畫之內容，建議可於後續計畫進行討論。	依處理情形辦理。
各項應用實例分析結果，就實務應用的可行性與效益，結合港區管理需求，建議發展的優先序。	建議的發展優先續為岸邊設施的自動化偵測與道路鋪面的判定，透過本計畫所發展之技術，已能拓展設施巡檢之視角，並以自動化的方式進行分析，提升現行巡檢作業之效率。	符合。
摘要中關於工作的部分以未來式撰寫，宜修正。另補充執行的具體成果。	感謝委員建議，已於報告內進行修正及補充。	所提意見及執行內容調整,列入修正定稿辦理。
P2-3 衛星定位基線解算軟體，是否有特定名稱，請補充。	謝謝委員建議，已補充說明衛星解算軟體是採用 MAGNET Tools。	依處理情形辦理。
P2-4 表中坐標系統，請補充，高程精度是如何得知？造成精度差異的原因為何？	謝謝委員建議，此精度為衛星網型解算後，透過軟體內建平差模式所估計各個點位之精度。精度差異為現地衛星觀測時，可能受到多種因素影響，例如網型、遮蔽角、衛星幾何分布等，已於報告內進行補充說明。	所提意見及執行內容調整,列入修正定稿辦理。
P2-6 海軍的潮位資料在報告中的應用？引用氣象局資料修正水域高程資料具體作法？請參考港研中心數據的應用。	使用海軍潮位資料是為了計算平均潮位，再將平均潮位轉換至正高系統。如此才能整合水域與陸域為相同 TWVD2001 系統，已於報告內進行補	所提意見及執行內容調整,列入修正定稿辦理。

	充說明。	
P2-5 請補充拍攝時間資訊。	謝謝委員建議，已補充並說明本計畫拍攝全港區時間約為三天完成。	依處理情形辦理。
P4-19 圖 8 應為誤植，並無此圖。	感謝委員建議，已於報告內進行文字修正。	依處理情形辦理。
P6-12、6-14、6-15、8-14、9-1、P10-5 錯字請修正。	感謝委員建議，已於報告內進行文字修正。	依處理情形辦理。
二、張瑞隆委員		
P2-5 建議採用的相機型號可以適當的補充；圖 2.5，控制點分佈在圖上不太明顯，可以做強化。	謝謝委員建議，已補充相機型號。另圖 2.5 已重新繪製。	所提意見及執行內容調整,列入修正定稿辦理。
P3-2 表 3-2，單次飛行範圍公頃數與文字描述不一致，建議修正。	感謝委員建議，已於報告內進行文字修正。	所提意見及執行內容調整,列入修正定稿辦理。
P3-22~P3-23 無人機電池通常充放 200-300 次就需要汰換，屬於耗材，可能無法五年再更新，建議做適當調整。	謝謝委員建議，無人機電量是以實務操作上一個月巡檢兩次頻率進行計算。一年約飛行 24 次。故五年內仍在電池使用壽命範圍。但考量到成本以及飛行安全因素，可調整至三年更新，已於報告內進行補充。	依處理情形辦理。
P4-19 文字所述"圖 8"編號可能是誤植，請修正。	感謝委員建議，已於報告內進行文字修正。	所提意見及執行內容調整,列入修正定稿辦理。
P8-1 建議本章 8.1 節撰寫前，能扼要說明一下管理平台。	感謝委員建議，已於報告內進行補充。	依處理情形辦理。
8.3 節電子地圖模組的介紹可再適度補強。	感謝委員建議，已於報告內進行補充。	所提意見及執行內容調整,列入修正定稿辦理。
三、林佑任委員		
對於廣大港區之土地與設施管理這是全新的領域，完整的控制平台從無到有自行建置發展到目前功能越來越完整很不容易，尤其願意以開放源方式建置。另外臺中港因為天然環境因素較惡劣;飛砂、漂沙、大潮差尤其季風對於無人機的飛行與取像分析影響較	感謝委員肯定。	符合。

大，而土地面積又是最大最需要 有自動化的輔助巡檢，如果臺中 港能發展出以無人機輔助巡檢， 則其他港亦應能適用，另外北淤 沙區的嘗試積沙分析亦有他港有 類似淤沙區只是規模小很多，發 展成果均可適用。		
2.3 節(P2-6) 數值地形模型有關水 位資料部分，為了修正 DSM 水域 高程資料以大氣海洋局過去 6 年 潮汐表計算平均潮位再用氣象局 臺中港潮位平均潮位對應，而臺 中港有臺中港築港高程系統，所 有建設以此為依據包含碼頭建 設，而港區所有應用包含水深等 也幾乎均以此高程系統為依據， 是否用此築港高程系統於計算岸 際設施之潮位影響時會更正確與 直接。	關於數值地形模型，在陸域部分是採 用 TWVD2001 正高系統，符合國家法 定高程基準。另在水域部分，是採用 平均潮位，再轉換至正高系統，已於 報告書中補充相關說明。	所提意見及 執行內容調 整,列入修正 定稿辦理。
3.3.1.1 節中之表 3-1 操作證名稱應 為「專業基本級」或「專業高 級」操作證，似非「高級專業」 與「基本級」名稱請確認。另今 年 10 月有新規定也請參考。另外 本表的名稱為「民航局無人機證 照與重量分級表」，民航局無人機 證照與重量有關的有二種，但本 表呈現的目的似乎主要為了能說 明本計畫採用之無人機分類等級 代碼(TYPE)與重量及所需證照之 關係，因牽涉到法令規定，因此 仍建議本表能設計得更完整避免 誤解。例如所需證照除了飛手的 操作證還有無人機的登記證，表 內未交代，建議可於表末備註機 身登記證之重量規定及機關法人 使用一律須登記之規定來說明。 另外本表若欲更完整，建議將專 業高級操作證的分類 G1G2G3 亦 可於備註說明。	謝謝委員建議由於港區飛行須排除各 種條件限制，故以專業高級操作證為 依據。此外，G1,G2,G3 在專業高級操 作證中能排除限制條件。包含: G1:夜 間飛行。地面或水域 400 尺區域已上 飛行 G2:投擲或噴灑物件 G3:人群聚集 地或遊行上空活動。已補充並說明於 報告書中。	依處理情形 辦理。
以紅外線偵測植栽，由於陰影的 部分也是相對低溫的部分，因此 雖然採用紅外線就是為了避免一	植栽的辨識主要是透過近紅外光進行 辨識，故陰影區域不會受到影響。本 計畫測試了 RIR，BIR，RGB 三種	所提意見及 執行內容調 整,列入修正

般影像鏡頭會受到影像中光線明暗或顏色的干擾純粹用溫度來呈現判斷，但是植栽本身的相對低溫特性似乎陰影也有這種低溫效果，請問陰影是否仍會干擾影響植栽範圍的判斷而導致有誤判情形。	NDVI 指標，目前皆沒有因為受到陰影而產生誤判之情形，已於報告書中補充相關說明。	定稿辦理。
無人機若搭配光達 3D 影像確能比一般影像鏡頭有更強大的功能，有其很高應用價值，但所述最大考量為其鏡頭等級之價格差距很大，有關鏡頭等級有關每平方米從 56 點到 680 點之內容，是否文內可以配合說明大約價格與等級價差倍數之描述，讓讀者有一個初步儀器預算的概念。	謝謝委員建議，已補充相關價格說明。	所提意見及執行內容調整,列入修正定稿辦理。
雖然無人機跟隨的功能以認 tag 訊號的方式較一般商用無人機跟隨的穩定度更好而不受光線影響，但以影像辨別跟隨可能有一個好處就是有可能可以做到橫向跟隨側拍不只有後面尾隨功能。請問 tag 的跟隨方式是否能做到側拍的跟隨方式，例如巡檢海堤就可以從外海側拍整個海側的海堤胸牆現況情形，無人機移動方向屬於橫向移動或是縱向移動，但是鏡頭側向拍攝機身位置保持在行動者之右手邊或左手邊方式。	無人機跟隨是採用距離與角度進行計算。在一般正常跟隨模式下無人機的 heading 與使用者平行為 0 度。若要使用側拍跟隨，可在初始調整為與使用者垂直 90 度的方向，故跟隨方向可依據拍攝目標位置自行調整。然而，跟隨技術本團隊正在持續開發中，然需考量相當多因素以及穩定性評估。	符合。
無人機可飛行時間影響效率很大，在飛行的參數中，安全係數的設置是起飛前已經設置固定，因此每次飛行任務之能飛行的時間起飛前就知道，但可能沒有效率。或安全係數所影響的飛行時間可以實際遇到的風速與出力情形而調整，過程高風速時間少則飛行時間可以較久，以提高有效的作業。	謝謝委員建議，目前的無人機開發現況較難以達到無人機以「自適應」的方法自動調整安全係數。故採用事前確認天氣，以及估算電量安全係數，仍是目前安全飛行的首要方法。待後續無人機之持續精進開發，或許能有機會達到自適應調整之目的。	符合。
飛控與拍攝控制平台：(1) 定翼機與多旋翼機飛行方式有很大的不同，平台可否依照定翼機或多旋翼機的飛行物理機制不同做設	(1)謝謝委員建議，目前平台所開發的系統是以多旋翼機進行開發，多旋翼機能穩定停懸，以及高機動性之特	符合。

定，例如定翼機轉彎有其較大之半徑無法急速上下移動及往後移動與側飛有其一定的慣性姿態與多旋翼機差距很大。(2) 巡檢所需拍攝的影像實際需求多元，有固定點固定角度的拍攝需求，可能也有轉換位置與角度的過程鏡頭所經過區域需連續拍攝的需求，這些飛行動作，本計畫飛控平台是否也可做到？	點，在巡檢取像時較有優勢。 (2)在報告書 4-11 頁至 4-13 頁中，有詳細說明取像邏輯方法，透過不同的指令以及任務代碼，無人機能執行不同的拍攝需求。	
自行組裝之無人機飛行高度之定高保持機制所應用的原理，其穩定性是否足夠？	目前商業無人機採用視覺定位配合氣壓定高。而本計畫自組無人機僅採用氣壓定高，此部分將加入後續改善事項。 (後續將加入更為準確之雷射定高，以確保無人機飛行穩定。)	依處理情形辦理。
在號誌的部分只要不小心被撞到位移偏一個角度可能就會影響行車視覺，會變成開車時看不到紅綠燈的燈號狀態而嚴重影響行車安全，因此 P6-14 有關號誌因為體積關係誤差來到 15 公尺的部分可能還需要更精準的影像。但由於號誌嚴重影響交通安全，無人機俯視巡查有其優勢，否則針對所有的紅綠燈為了安全可能都要加裝攝影機監視其是否妥善，但即便都加裝攝影機可能也需要耗費人力的人工辨識或採自動判別辨識。由於對於行車安全很重要建議可以再精進。	紅綠燈號誌的巡查較為實際的方法應該是以車檢的形式來進行，一是與一般行車視覺相符，更貼合實際情況；二是行車視角方觀察到紅綠燈燈號的情況。以無人機俯視是無法明確辨別燈號的情況，僅能從紅綠燈位置判斷是否發生位置偏移等等。若加裝攝影機監視，則可採用自動辨識判別，惟加裝所需之額外硬體成本也是考量因素。	符合。
感謝將北淤沙區積沙分析納入研究內容，北淤沙區的治理可以說是臺中港的命脈。由於其面積廣大，若影像建模誤差超過 10 公分，則 10 公頃面積即可能有 1 萬立方體積的誤差，建議可以再精進。	謝謝委員建議，由於北防砂堤為特殊地理環境，地形屬於狹長型，且中間沙洲區域無法布設控制點。現階段是採用堤防上之特徵點作為控制點，雖精度較差，仍能呈現兩期之相對差異。	符合。
四、港研中心蔡立宏主任		
UAV 依照背景的地形、高程、障礙物做航行路徑的規劃，未來若有動態障礙物(如船舶) 或高空電纜線，是否能自行避碰。	目前無人機的避障演算法是基於高精度的數值地形模型。但若是針對移動障礙物，則須仰賴機上之避障感測器。	符合。

北淤沙區沙灘土方分析中，因臺中港潮差大、潮間帶大，建議未來飛行時間在乾潮時先進行遠域水線附近地區的拍攝。	謝謝委員建議，遠域水線先行拍攝是很好方法，也能更完整地拍攝到沙洲。	符合。
若要再提高辨識度，是否可以將航行高度降低，提高圖像解析度。	提升解析度的確能看到更細緻之影像。然而影像辨識最主要的關鍵為龐大的訓練資料，若要提升辨識準確性，後續應持續蒐集大量影像資料以精化訓練模型。	依處理情形辦理。
五、港研中心李俊穎科長		
建議彙整計畫成果，說明平台已可應用、具部分可應用及未來可加入部分，加以補述。	感謝委員建議，已於報告內進行補充說明。	所提意見及執行內容調整,列入修正定稿辦理。
建議將完成平台可實務使用部分製作簡易說明及操作手冊，供後續移轉及人員使用。	感謝委員建議，將於移轉時另外提供操作手冊。	依處理情形辦理。
7.5 節所提不同軟體所得正射影像下物體有明顯差距，建議補充說明其適合方式。	目前市面上之商業建模軟體已非常成熟，且會持續更新軟體演算效率，故商業軟體產製成果較佳。開源軟體目前僅有釋出固定版本，可能對於某些特地場景之建模精度不佳，故兩者成果才會看起來有差距。	符合。
圖 8.26 是否能驗證其 PCI 值之合理性？	感謝委員建議，已於報告內補充驗證結果。	所提意見及執行內容調整,列入修正定稿辦理。
六、本所陳天賜副所長		
建議港研中心及港務公司針對港區需要巡檢的標的物進行盤點統計，評估其適用無人載具進行巡查之優先項目，以利後續計畫執行。	感謝委員建議。	符合。
本計畫建置之平台針對不同巡查標的物有不同處理事項，應和港務公司各部門相關業務整合，增加平台實務應用性。	感謝委員建議。	符合。

附錄七、期末審查簡報資料



計畫目的及效益

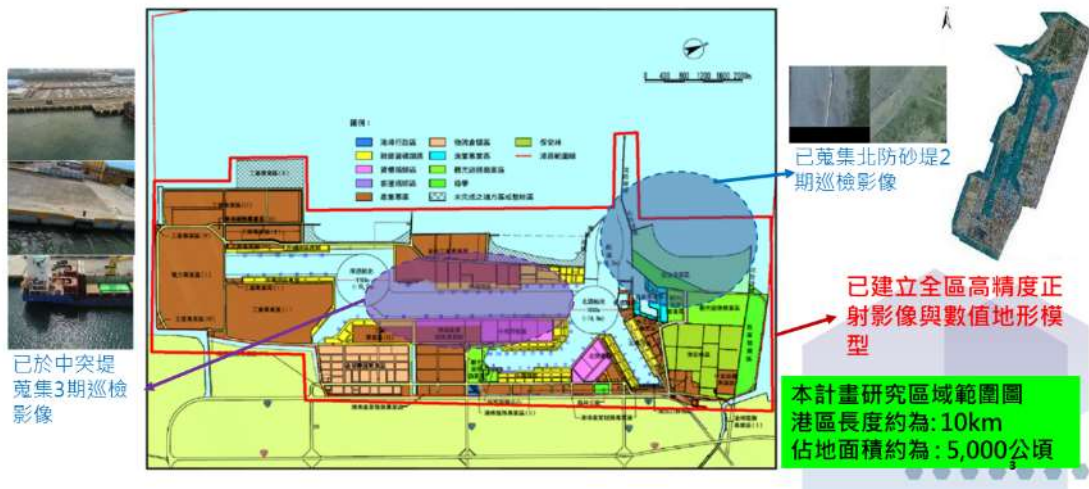
(一)計畫目的

建立一套結合機器學習技術與無人機影像的港區空間資訊整合應用方案，能有效利用定期且自動化獲取港區之大量空拍影像，藉以促進港區精準的智慧化空間資訊管理應用。

(二)預期效益

1. 可應用於港區的定期巡檢任務，並可針對特定任務與目標進行自動化的追蹤與判斷，降低人力負擔並提升任務執行品質。
2. 透過空間資訊的整合，可有效發揮各式資訊之特色，建構港區更為完整的空間資訊智慧管理基礎。

研究範圍



工作項目

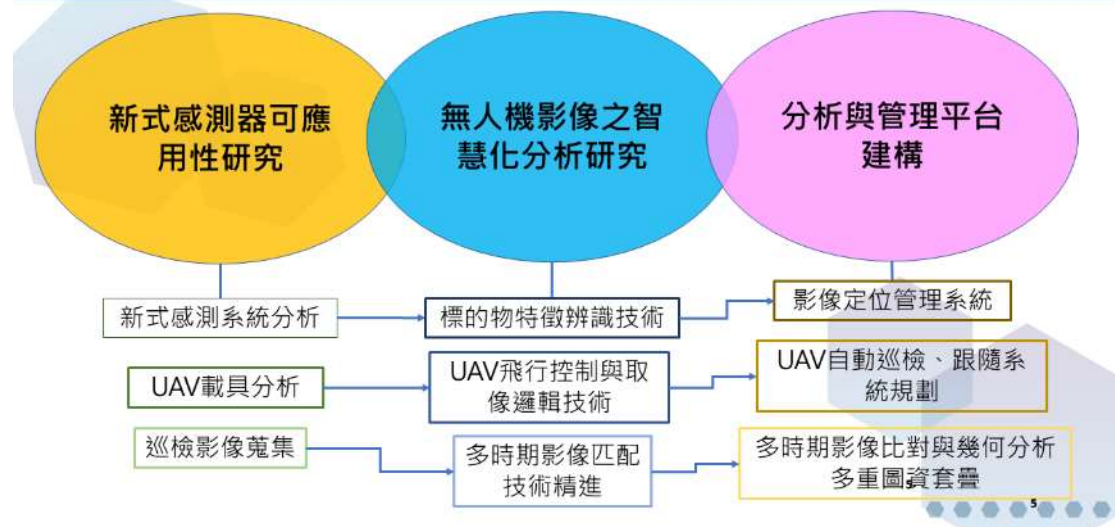
第一年度：

- 無人機飛行載具及影像感測器系統分析
- 文獻資料蒐集建構分析方法
- 飛行載具控制取向邏輯分析
- 影像資料蒐集
- 自動化三維建構與空間資訊賦予
- 特定物件辨識及變遷偵測分析
- 品質評估與行動依據
- 教育訓練

第二年度：

- 新式感測器可應用性研究
- 影像資料蒐集
- UAV載具分析及飛控邏輯技術
- 無人機影像之智慧化分析研究
- 空間資訊整合平台
- 品質評估與行動依據
- 教育訓練

研究流程

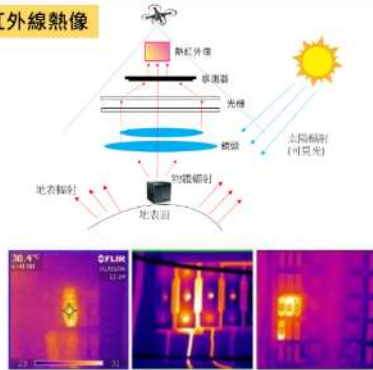


新式感測器可應用性研究

1. UAV感測器原理
2. UAV感測器規格
3. UAV感測器應用
4. 巡檢影像蒐集

感測器原理

紅外線熱像

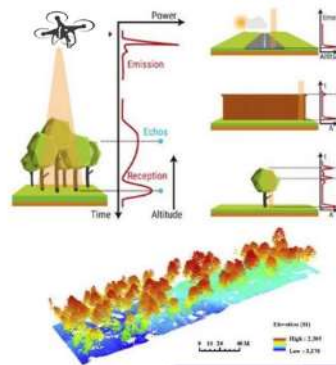


熱紅外線像

利用熱像儀測量目標本身與背景間的紅外線差可以得到不同的熱紅外線形成的紅外圖像



光達



光達點雲

透過雷射掃描儀向地面發出雷射光，對地物之物體進行掃描與紀錄三維坐標



感測器規格

以航高120m地面解析度為例

紅外線熱像

FLIR VUE



種類: 可替換式鏡頭
解析度: 320x256
相機重量(含雲台): 200g以下
56.3cm/pixel

FLIR A65



種類: 可替換式鏡頭
解析度: 640 x 512
相機重量(含雲台): 500g以下
28.1cm/pixel

FLIR A700



種類: 可替換式鏡頭
解析度: 640 x 480
相機重量(含雲台): 500g以下
28.8cm/pixel

FLIR T1K



種類: 模組鏡頭
解析度: 1024x768
相機重量(含雲台): 1000g以下
17.3cm/pixel

光達

TOPODRONE LiDAR 100 LITE + (50萬~70萬)



操作範圍: 70 m
水平視野: 360°
垂直視野: 30°
PPS單返回模式300 000 Hz
PPS雙返回模式600 000 Hz

56pts/m²

RIEGL miniVUX-1UAV



雷射脈衝頻率: 100 kHz
測量頻率: 200,000次/秒
掃描速度: 100次掃描/秒
精度: ±2cm
FoV: 360°
重量: 1.55公斤

150pts/m²

RIEGL miniVUX-1DL (180萬~300萬)



雷射脈衝頻率: 1.8 MHz
測量頻率: 1,00,000次/秒
掃描速度: 150次掃描/秒
精度: ±2cm
FoV: 46°
重量: 2.4公斤

300pts/m²

RIEGL VUX-120



雷射脈衝頻率: 1.8 MHz
測量頻率: 1,500,000次/秒
掃描速度: 400次掃描/秒
精度: ±2cm
FoV: 100°
重量: 2公斤

680pts/m²



UAV感測器應用---熱紅外(植栽辨識)

拍攝區域---梧棲漁港

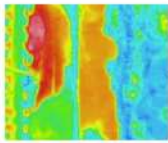


感測器規格

Model	AVG1506MD
Infrared Detector	Uncooled Focal Plane Array (Micro Bolometer)
Infrared Detector Pixels	320(H) x 240(V) pixels
Infrared Spectral Range	8 ~ 14 μm
Resolution (NETD)	≤ 0.05°C (with 5% improvement at 30°C)
Accuracy	± 2% or ± 2°C
Measuring Range	Range 1: -40 ~ 120°C Range 2: 0 ~ 500°C
Thermal Digital Data Resolution	14bits
Frame Rate	8.5 Frames/sec
Video Output	NTSC / PAL
Standard Lens	14mm
View Angle	H: 32 Degree V: 24 Degree
Working Distance	>30m
Remote Control Interface	12 sets: REC, LEFT, AF, UP, AS, LED, RIGHT, VIS, MIBAL, DOWN, PLAY, ENTER



紅色通道(R)
綠色通道(G)
藍色通道(B)



紅外光通道(IR)

常態化差異植生指標

NDVI-RGB

$$\frac{R_{Red} - R_{blue}}{R_{Red} + R_{blue}}$$

NDVI-red filter

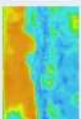
$$\frac{R_{IR} - R_{red}}{R_{IR} + R_{red}}$$

NDVI-blue filter

$$\frac{R_{IR} - R_{blue}}{R_{IR} + R_{blue}}$$

應用於葉子覆蓋和植物健康的通用指標

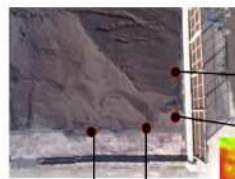
UAV感測器應用---熱紅外(植栽辨識)

植栽條件		NDVI: 0.2~1			
光學影像	人工框選	NDVI-red filter	NDVI-blue filter	NDVI-RGB	
					
Accuracy		73.7%	76.6%	83.8%	
Precision		54.8%	56.9%	99.6%	
光學影像	IR影像	人工框選	NDVI-red filter	NDVI-blue filter	NDVI-RGB
					
Accuracy		85.6%	92.3%	70.9%	
Precision		93.6%	89.8%	99.9%	

NDVI_{IR} 有較為準確的表現；**NDVI_{RGB}** 的表現則可能有缺漏植栽的辨識機率較高

UAV感測器應用---熱紅外(煤炭堆溫度監控)

拍攝區域---港區某物流公司



人工量測-探針式測溫計

人工量測：36.0度
熱影像：35.4度

人工量測：31.7度
熱影像：31.0度

人工量測：34.7度
熱影像：32.5度

人工量測：36.8度
熱影像：35.6度

熱影像所量測溫度準確性落在 $\pm 2^\circ$



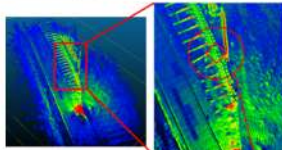
11

UAV感測器應用---光達(消波塊變遷監測)



感測器規格

Range	100m / 328ft
Data Rate	330,000 points per second
Field of view	360° horizontal FOV 30° (x 55° in 15°) vertical FOV
Rate	~0.6m/s (at 10,000m/s² / 110,000m/s²)
Accuracy	Laser accurate to a 30mm / ± 1.2m
Formats	ply, xyz or .las
Storage	1TB SSD
Weight	1730g (3.8lbs)



光達飛行高度：10m

光達飛行速度：1.16 m/s

光達掃描頻率：5Hz

面積：點數：密度(pts/m²)

10*10：103441/2：517.2

5*5：30471/2：609.4



	光達	光學正射影像	地面量測真值
拍攝方式	使用光達儀器拍攝	使用光學相機拍攝，並建模製作正射影像	使用雷射測距儀進行地面量測
量測距離	1.96m	1.94m	1.95m
優點	精度落在1cm以內，且具備三維幾何資訊	精度落在1cm以內，解算與資料處理時間較短	
缺點	設備昂貴，相對影響資料量大	僅具備二維資訊	
照片示意圖			

12

UAV感測器應用---光學(沙洲範圍分析)

PhotoScan



Opensource

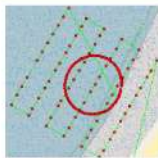


照片：150張
照片解析度：5472 * 3648

使用PhotoScan做沒有控制點的匹配與建模

軟體	製作時間	點雲數量	沙洲(10*10)點雲密度
PhotoScan	(medium) 30分鐘	891,8933	64.88
Opensource	10~12小時	4818,8964	1987.44

UAV感測器應用---光學(沙洲範圍分析)

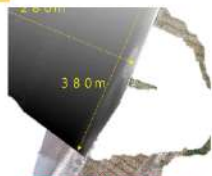


無人機拍攝參數設定：
航高：120m
前後重疊率：80%
左右重疊率：60%
環拍：每4度拍一張



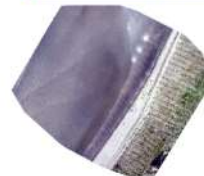
以防沙堤上特徵點之 (X,Y,Z)
為控制點約制

第一期 2022/04/14



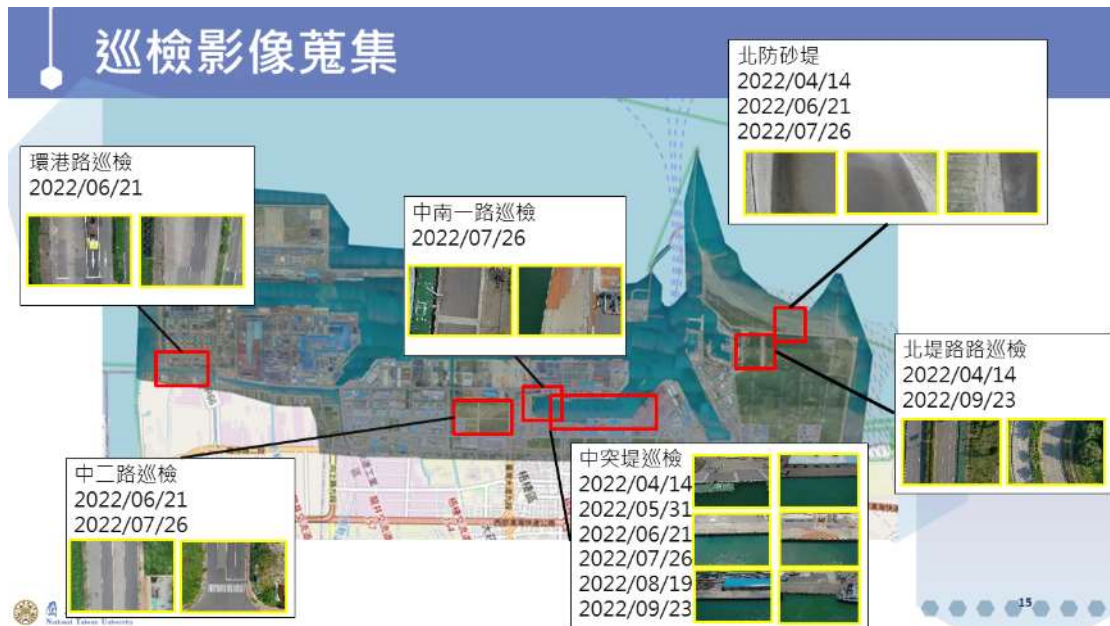
體積: 324,632.293m³

第二期2022/06/21



體積: 379,351.528m³

兩期體積差異：54,719.235 m³ (約 1 / 6 的總體積)
26座奧運標準游泳池



UAV載具分析及飛控邏輯技術

1. 使用UAV硬體規格
2. 航線規劃說明---無人機飛控系統
3. 飛行檔案Mavlink標準格式
4. UWB跟隨技術現況
5. 無人機自動跟隨測試成果(測試一、二、三)
6. 航線規劃說明---無人機飛控系統
7. 無人機航線規劃測試成果(測試一、二、三)
8. 巡檢影像成果統整

16

使用UAV硬體規格



引入之巡檢用無人機規格表

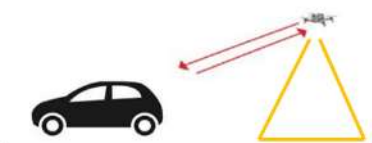
機架	六軸機架(軸距約920mm)
飛控系統	V5 NANO開源飛控(含GPS)
遙控器	AT9S PRO
影像傳輸系統	圖傳發射及接收模組(5.8G)・配備1台7吋圖傳接收螢幕
數傳系統	使用915MHz100mw數傳模組
雲台系統	上置式雲台(相機穩定器)
重量	3~5公斤
避障系統	使用雷射避障・前後左右及上方共5向避障

機體飛行任務效率

平均飛行時間	10~20分鐘(會依據飛行環境變動)
最佳飛行速度	5 m/s
軌跡紀錄	可以在飛行任務完成後下載

UAV自動跟隨

本期預計導入無人機自動跟隨技術
自動跟隨車子的移動並做高空對道路做AI巡檢



光學影像

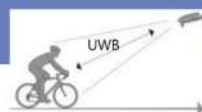
目前市場上較為頻繁的作法
透過深度學習影像辨識光學影像中
的人物做辨識並固定距離做跟隨

缺點:

1. 無法在瞬間而做
2. 辨識物體可能因相似物體接近導致辨識錯誤



通訊跟隨



利用UWB定位技術與特定對象進行
通訊，並固定距離與角度，做長時間
跟隨。

UWB優勢:

1. 低功耗
2. 高定位精度
3. 訊號穿透力強
4. 高訊號抗擾性

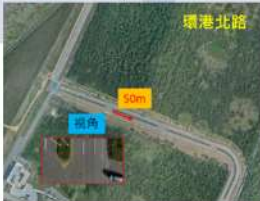
1. 能夠在瞬間而做
2. 只會追蹤有訊號的目標，解決辨識錯誤的問題

00:00:00.00

無人機自動跟隨測試成果

測試一: 跟隨人行走

- 跟隨速度: 1~2km/hr
- 跟隨距離: 50m
- 飛行高度: 15m
- 飛行速度: 2km/hr



測試二: 跟隨車

- 跟隨速度: 5km/hr
- 跟隨距離: 155m
- 飛行高度: 20m
- 飛行速度: 5km/hr



測試三: 跟隨車

- 跟隨速度: 10km/hr (測試最大值)
- 跟隨距離: 100m
- 飛行高度: 20m
- 飛行速度: 10km/hr



實驗小結:

- 無人機跟隨前後方向可以穩定不跟丟
- 無人機跟隨左右方向須由人操作穩定控制(若有風會左右偏移)
- 跟隨速度現階段可達10km/hr
- 轉彎跟隨技術仍在調整

航線規劃說明---無人機飛控系统



無人機遙控器
1. 控制飛機起降
2. 啟動航線規畫



無線傳輸收發射器:
1. 搭載於筆電上
2. 傳輸航線規畫成果MAVLink
3. 接收無人機電量、飛行姿態、飛行位置資訊

無線溝通

無線溝通

無線傳輸收發射器:
1. 搭載於無人機上



無人機航線規劃測試成果檢核---多點巡航



 **Northumbria University**
Northumbria University



無人機航線規劃測試成果---地形測繪

MAVlink檔

Year	Age	Sex	Height (cm)	Weight (kg)	Body Mass Index (kg/m ²)	Waist Circumference (cm)	Hip Circumference (cm)	Waist-Hip Ratio	Trunk Fat (%)	Visceral Fat (cm)	Subcutaneous Fat (cm)	Visceral Fat Index (cm ²)	Subcutaneous Fat Index (cm ²)	Visceral Fat to Subcutaneous Fat Ratio
2001	16	M	170	65	22.0	85	95	0.89	12	1.5	2.5	1.5	2.5	0.6
2002	16	M	172	68	22.5	88	98	0.90	13	1.6	2.6	1.6	2.6	0.6
2003	16	M	174	70	22.8	90	100	0.90	14	1.7	2.7	1.7	2.7	0.6
2004	16	M	176	72	23.0	92	102	0.90	15	1.8	2.8	1.8	2.8	0.6
2005	16	M	178	75	23.5	95	105	0.90	16	1.9	2.9	1.9	2.9	0.6
2006	16	M	180	78	24.0	98	108	0.90	17	2.0	3.0	2.0	3.0	0.6
2007	16	M	182	80	24.2	100	110	0.91	18	2.1	3.1	2.1	3.1	0.6
2008	16	M	184	82	24.4	102	112	0.91	19	2.2	3.2	2.2	3.2	0.6
2009	16	M	186	85	24.6	105	115	0.91	20	2.3	3.3	2.3	3.3	0.6
2010	16	M	188	88	24.8	108	118	0.91	21	2.4	3.4	2.4	3.4	0.6
2011	16	M	190	90	25.0	110	120	0.92	22	2.5	3.5	2.5	3.5	0.6
2012	16	M	192	92	25.2	112	122	0.92	23	2.6	3.6	2.6	3.6	0.6
2013	16	M	194	95	25.4	115	125	0.92	24	2.7	3.7	2.7	3.7	0.6
2014	16	M	196	98	25.6	118	128	0.92	25	2.8	3.8	2.8	3.8	0.6
2015	16	M	198	100	25.8	120	130	0.92	26	2.9	3.9	2.9	3.9	0.6
2016	16	M	200	102	26.0	122	132	0.92	27	3.0	4.0	3.0	4.0	0.6
2017	16	M	202	105	26.2	125	135	0.92	28	3.1	4.1	3.1	4.1	0.6
2018	16	M	204	108	26.4	128	138	0.92	29	3.2	4.2	3.2	4.2	0.6
2019	16	M	206	110	26.6	130	140	0.93	30	3.3	4.3	3.3	4.3	0.6
2020	16	M	208	112	26.8	132	142	0.93	31	3.4	4.4	3.4	4.4	0.6
2021	16	M	210	115	27.0	135	145	0.93	32	3.5	4.5	3.5	4.5	0.6
2022	16	M	212	118	27.2	138	148	0.93	33	3.6	4.6	3.6	4.6	0.6
2023	16	M	214	120	27.4	140	150	0.93	34	3.7	4.7	3.7	4.7	0.6
2024	16	M	216	122	27.6	142	152	0.93	35	3.8	4.8	3.8	4.8	0.6
2025	16	M	218	125	27.8	145	155	0.93	36	3.9	4.9	3.9	4.9	0.6
2026	16	M	220	128	28.0	148	158	0.93	37	4.0	5.0	4.0	5.0	0.6
2027	16	M	222	130	28.2	150	160	0.93	38	4.1	5.1	4.1	5.1	0.6
2028	16	M	224	132	28.4	152	162	0.93	39	4.2	5.2	4.2	5.2	0.



無人機航線規劃測試成果檢核---地形測繪



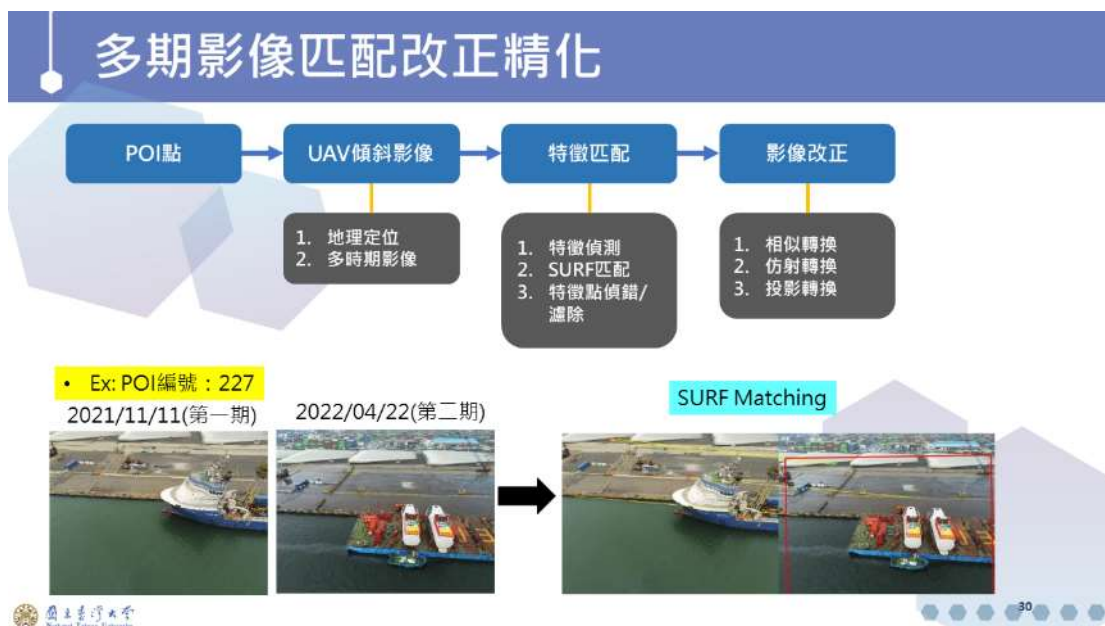
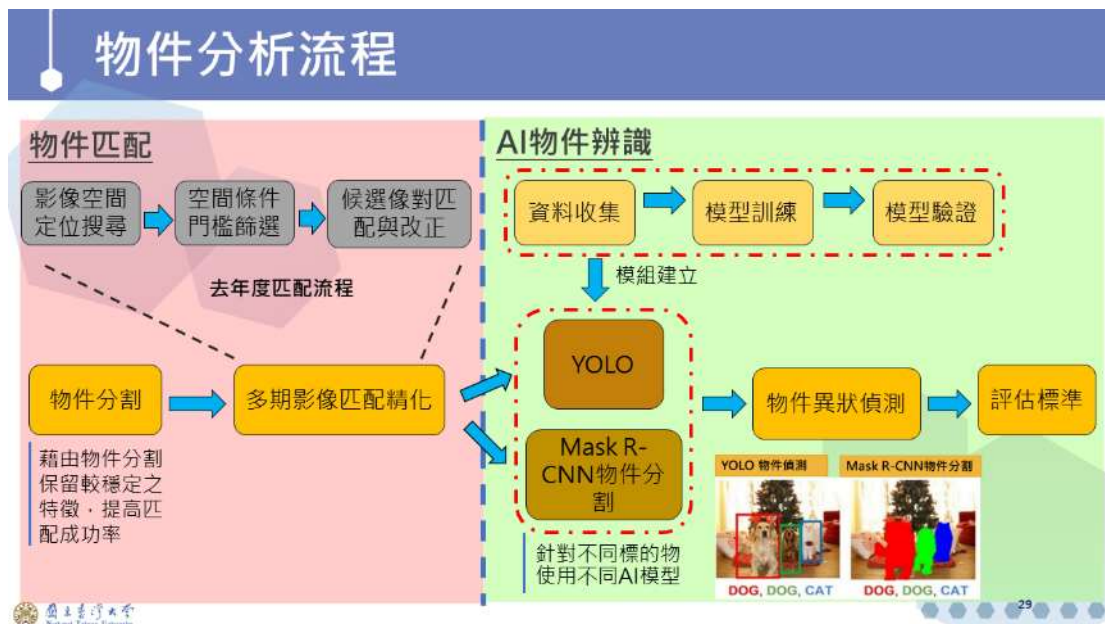
飛行路徑誤差統計表

項目	數值
最大誤差	2.046 m
最小誤差	0.668 m
誤差平均值	0.905 m
誤差標準差	0.304 m
誤差RMSE	0.955 m



無人機影像之智慧化分析

1. 物件分析流程
2. 多期影像匹配改正精化
3. 多期影像改正分析
4. 中突堤POI多期影像測試(案例1、2、3)及分析
5. AI自動化檢測標的物與檢測邏輯
6. 路面裂縫偵測
7. 岸邊設施的資料偵測及邏輯判斷
8. 道路標線資料偵測



多期影像改正分析

影像改正

- 像對參數
- 相似轉換
- 仿射轉換
- 投影轉換

改正門檻條件：
像對參數差異
($\Delta x < c/4, \Delta y < r/4$)

1. 相似轉換

$$X' = M^{-1}XM + \Delta$$

其中 X 為原始影像資訊、 X' 為改正後影像資訊、 M 為相似轉換方陣、 Δ 為平移參數。

2. 仿射轉換

$$\begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \cos \theta & -S \sin \theta & \Delta_x \\ S \sin \theta & S \cos \theta & \Delta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

(x_i, y_i) 為原始影像坐標、(x_i', y_i') 為改正後影像坐標、 (Δ_x, Δ_y) 為平移參數、 S 為尺度、 θ 為旋轉角。

3. 投影轉換

$$\begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \\ z_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}$$

其中 (x_i, y_i) 為原始影像坐標、(x_i', y_i') 為改正後影像坐標、 z_i 及 z_i' 於二維影像中設定為相同定值、 a 為投影轉換矩陣。

多期影像改正分析---中突堤POI多期影像測試

POI編號：262

2021/11/11

2022/04/22

1. 相似轉換

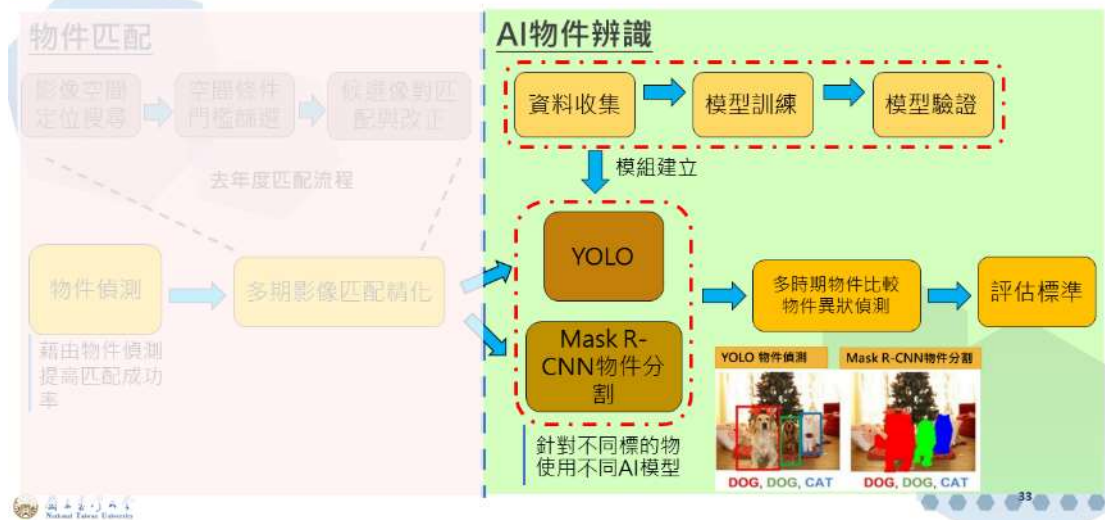
2. 仿射轉換

3. 投影轉換

物件編號	基期影像	相似轉換影像 (pix)	相似轉換尺度差異 (%)	仿射轉換影像 (pix)	仿射轉換尺度差異 (%)	投影轉換影像 (pix)	投影轉換尺度差異 (%)
1	1646	1620.4	1.6	1624.1	1.3	1646	0.0
2	1356.5	1338.1	1.4	1341.8	1.1	1352.8	0.3
3	2391.7	2285.6	4.4	2321	3.0	2356.3	1.5

投影轉換影像差異最小、效果最好

研究流程---AI物件辨識

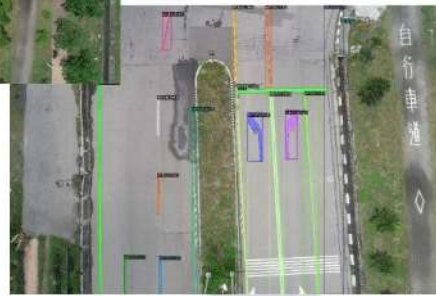
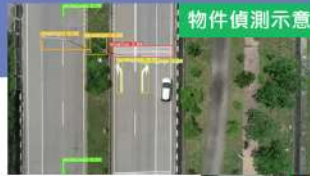


AI自動化檢測標的物與檢測邏輯

項目	方法	實際之多時期檢測邏輯	說明
道路標線	實例分割	不同時期道路標線之損壞程度	道路分向線、禁止變換車道線、行車分向線、車道線、停止線、指向線
人手孔蓋	物件偵測	不同時期物體存在與否、物體位置是否發生偏移	以北堤路設施樣式為目標
岸邊設施	實例分割	不同時期存在與否、物體損壞與否	包含車擋、反光板與碰撞墊，以20-25號碼頭設施樣式為目標
道路鋪面裂縫	語意分割	以裂縫數量與裂縫寬度統計出路況損壞程度	以北堤路設施樣式為目標
路燈	物件偵測	不同時期存在與否、是否發生變形偏移	以北堤路設施樣式為目標
紅綠燈	物件偵測	不同時期存在與否、是否發生變形偏移	以北堤路設施樣式為目標

道路標線辨識

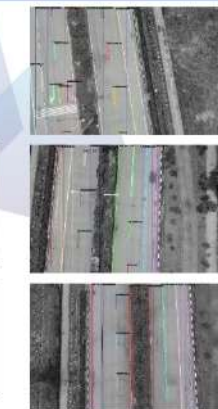
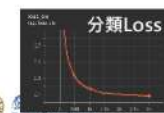
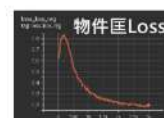
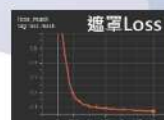
- 模組：Mask-RCNN
- 訓練資料：
 - 20220422所攝之空拍影像81張，並進行標注。
 - 以ResNet50-FPN訓練於COCO dataset的pretrain model作為特徵提取層。
- 驗證資料：
 - 20220422所攝之空拍影像隨機挑選16張。
- 測試資料：
 - 20220422所攝之空拍影像隨機挑選5張。



各項設施標註數量			
單白線	708	停止線	6
雙白線	51	斑馬線	0
單黃線	160	指向線	24
雙黃線	0		
總共			949

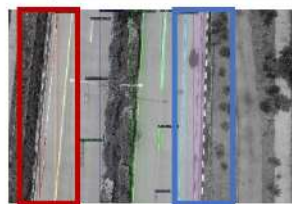


道路標線辨識---模型訓練成果分析



Loss收斂，模型可行

物件	物件框	分割
	Average Precision(%)	Average Precision(%)
單白線	74.73	30.63
雙白線	72.65	61.56
單黃線	73.79	3.3
指向標誌	68.39	44.58
停止線	11.78	8.42
AP50	72.55	48.92



1. 道路標線在影像上如果是筆直線段(藍色)，辨識效果相當良好。
2. 若有彎曲(紅色)導致物件框較大時，辨識效果較差。推測其原因在於彎曲時物件框較大，但內含的標線面積稀少，不易模型進行分割。



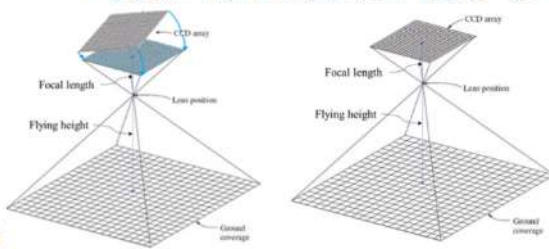
人手孔蓋、路燈辨識

- 模組：Yolov5
- 訓練資料：
 - 5cm解析度正射底圖，港區道路隨機截圖110張。
 - 以Yolov5s作為pretrain model。
- 驗證資料：
 - 5cm解析度正射底圖，港區道路隨機截圖22張。
- 測試資料：
 - 5cm解析度北堤路正射影像，截圖之間無重疊。



實際物點核算

- 輸入資料
 - 影像EXIF檔中提取拍攝瞬刻的位置(E, N)、姿態(yaw, pitch, roll)、相對起飛高度。
- 計算流程
 - AI辨識出物件像素範圍。
 - 利用共線式(1)改寫如式(2)，像空間→物空間
 - 連貫照片中物件實際物點相近者，視為同一物件。



$$\begin{aligned} X - X_L &= (Z - Z_L) \frac{a_1x + a_2y - a_3y}{c_1x + c_2y - c_3f} \\ Y - Y_L &= (Z - Z_L) \frac{b_1x + b_2y - b_3y}{c_1x + c_2y - c_3f} \end{aligned} \quad (1)$$

$(Z - Z_L) \cong -\text{相對起飛高度}(RH)$

$$\begin{aligned} X - X_L &= -RH \frac{a_1x + a_2y - a_3y}{c_1x + c_2y - c_3f} \\ Y - Y_L &= -RH \frac{b_1x + b_2y - b_3y}{c_1x + c_2y - c_3f} \end{aligned} \quad (2)$$

(x, y) : 物件相片位置； (X, Y, Z) : 物件物空間位置；
 (X_L, Y_L, Z_L) : 相機物空間位置； f : 相機焦距； $a_n \sim c_n$: 選擇參數

物點核算測試成果---人手孔蓋、路燈



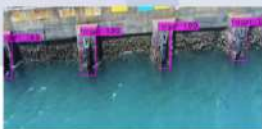
物件	數量	人工計算量
第一類人孔蓋 (紅)	6	6
第二類人孔蓋 (粉紅)	3	3
路燈 (橘)	38	38
紅綠燈 (黃)	1	1

搭配物點核算可檢核是否重複計算或漏偵測

岸邊設施辨識---方法比較

去年度成果 YOLOv4物件辨識測試

單一物件



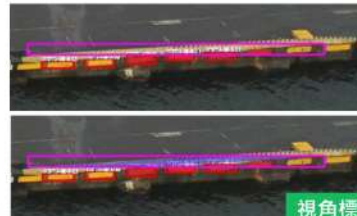
多物件



視角統一

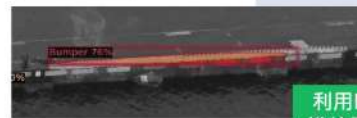
今年度精進

① 物件辨識

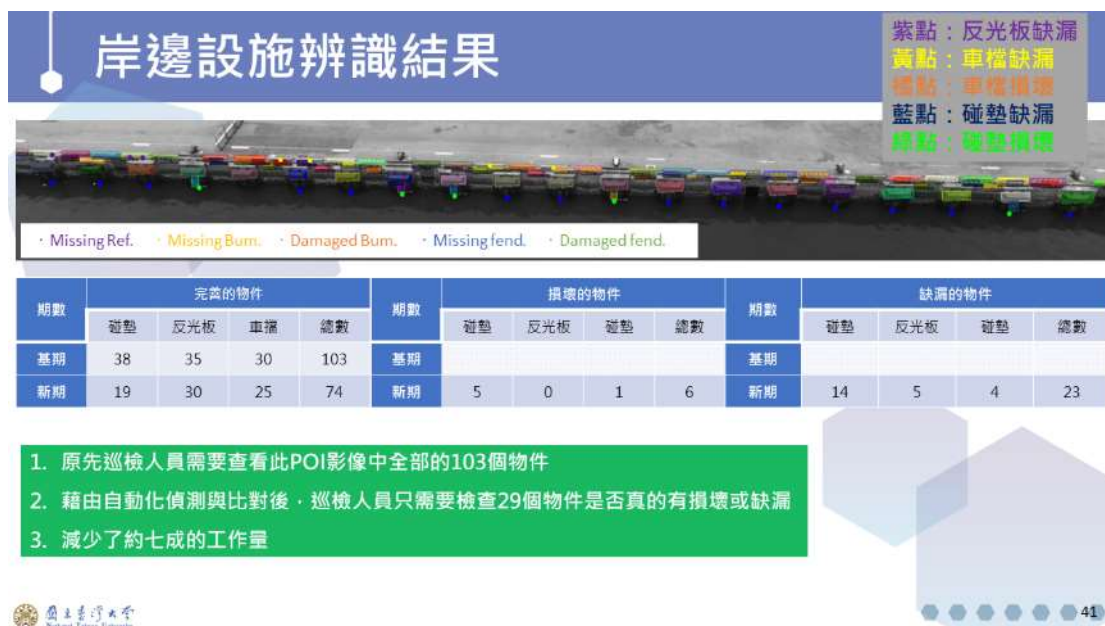
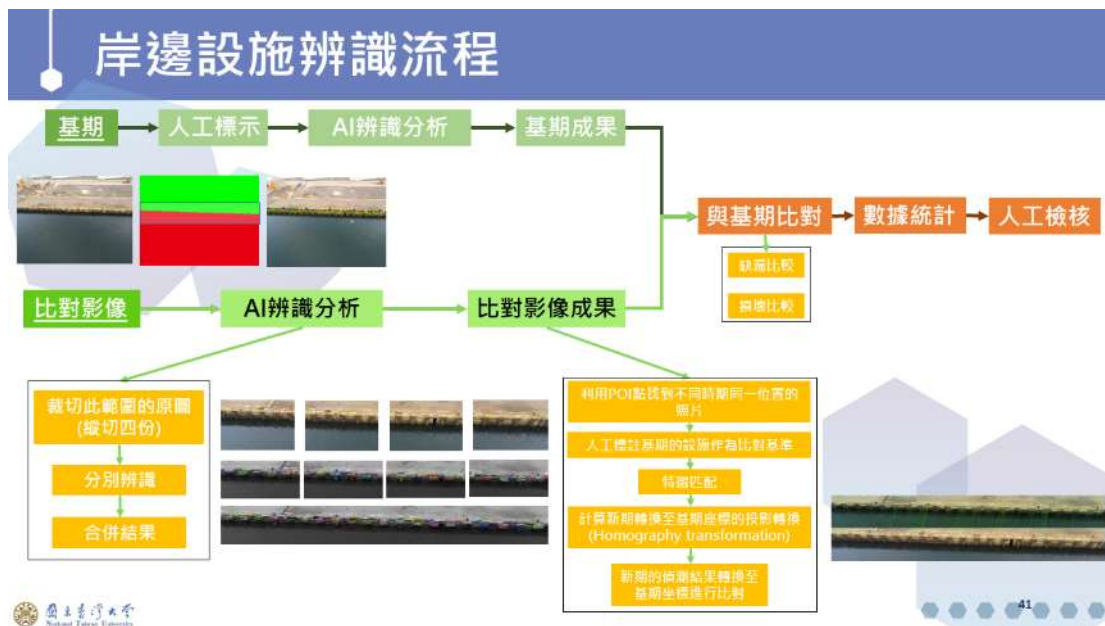


視角標準化之物件辨識

② MaskRCNN



利用MaskRCNN辨識結果進行體積分析



路面破損偵測

- 訓練樣本：highways in the states of Espírito Santo, Rio Grande do Sul and the Federal District.

港區樣本持續增加中

- 訓練樣本數：2235 張，每張圖有三種mask，分別為裂縫、坑洞及路面本身，僅取裂縫部分訓練。



- 訓練模型：U-net

- Test_size=0.15 (1896 training, 335 validation, total 2231)



- 裂縫大小、長度定義：考慮網狀及橫向裂縫

路面破損偵測---路面分割

Real data 路面原始影像



(巴西資料庫)



(團隊蒐集影像)

Label 路面分割標記



(巴西資料庫)

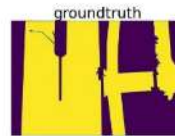


(團隊蒐集影像)

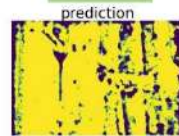
以港區正射影像進行測試成果



raw

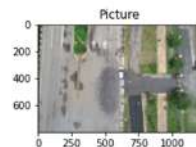


groundtruth

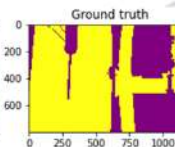


IOU:0.66

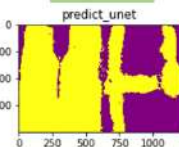
prediction



Picture



Ground truth



IOU:0.92

predict_unet

透過加入自行蒐集區域影像，讓AI預測更為準確

路面破損偵測---坑洞

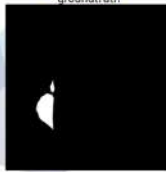
Real data



raw

(團隊蒐集影像)

Label



groundtruth

以港區拍攝影像進行測試成果



prediction IOU=0.874

raw



(巴西資料庫)

groundtruth



prediction IOU=0.492



標線與水漬上也不會有誤判的情形

45

路面破損偵測---裂縫

Real data 原始影像



(巴西資料庫)

Label 裂縫標記



(巴西資料庫)

以港區拍攝影像進行測試成果



raw



groundtruth



prediction IOU=0.299

ioU in test dataset

dataset	Background IoU	Foreground IoU	Mean IoU
Pretrain data	0.997	0.062	0.53
With local data	0.997	0.416	0.707

加入了團隊蒐集影像使模型表現上升

雜訊會影響模型表現，但模型已經能將裂縫的位置給分割出來，已具一定參考性

46

路面破損評估(PCI)--- 流程圖

基於市區道路管理維護與技術規範手冊研究【[柔性鋪面損壞調查手冊](#)】

13種類別(龜裂、縱向及橫向裂縫、塊狀裂縫、坑洞及人孔、車轍、補綻及管線回填、推擠、隆起與凹陷、冒油、波浪狀鋪面、車道與路肩分離、滑溜裂縫、骨材剝落)中僅取龜裂、坑洞及人孔兩項評估

嚴重程度分為輕級、中級及重級

根據先前裂縫寬度分別設定1.8、3公分作為門檻標準



裂縫分級定義



評估成果

- 測試影像:2022/9/23
- 每10公尺設一段
- 綠(優)→紅(劣)

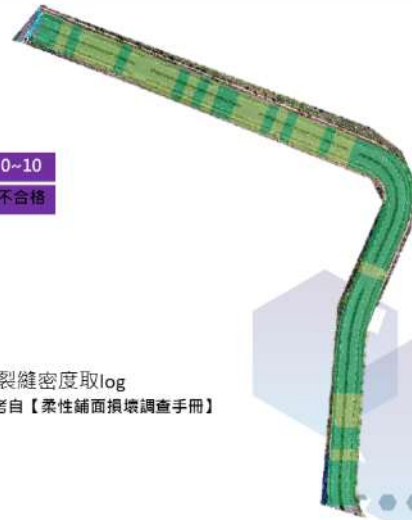
PCI:	85~100	70~85	55~70	40~55	25~40	10~25	0~10
等級	最佳	很好	好	尚可	差	很差	不合格

$$\text{裂縫密度} = \frac{\text{裂縫總量}}{\text{樣本單位面積}}$$

PCI公式:

$$\begin{aligned} \text{low } d &= -1.7 + 4.45 x + 5.18 x^2 \\ \text{Mod } d &= 2.1 + 11.51 x + 4.93 x^2 \\ \text{Sev } d &= 8.3 + 14.06 x + 12.96 x^2 \end{aligned}$$

X=裂縫密度取log
參考自【柔性鋪面損壞調查手冊】



平台現況

- 平台架構
- 功能現況

平台架構



功能現況---圖層



功能現況---量測功能

量測功能



功能現況---路徑規劃

路徑規劃



規劃成果列表

專案編號	模式	名稱	規劃時間(秒)
353	多點路徑	規劃路徑	45
364	多點路徑	規劃路徑	46.052
361	多點路徑	規劃路徑	56.437
362	多點路徑	規劃路徑	32
363	多點路徑	規劃路徑	32
364	多點路徑	規劃路徑	34
365	多點路徑	規劃路徑	35

成果查詢



規劃路徑轉成mavLink檔案格式輸出

功能現況---POI影像匹配

影像匹配

儲存至對應POI位置

轉至同一視角

55

功能現況---岸邊物件辨識

岸邊物件辨識成果

物件辨識成果列表

POI編號	2022-09-23	2022-08-19	2022-07-26	2022-06-21	2022-05-31	2022-04-14	2021-11-11
245	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)
442	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)
213	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)	船舶(汽機) 汽機(204年) 汽機(204年)

AI辨識中...

辨識結果

56

功能現況---岸邊設施辨識

岸邊設施辨識成果

設施物辨識成果列表

POI編號	2022-07-26
227	存在(17)/毀損(0)/消失(0)

滑鼠滾輪放大、縮小

辨識結果

彈出新視窗

辨識成果：物件框為存在物件、藍點為部分毀損物件位置、綠點為遺失(未被偵測到)物件位置



57

功能現況---footprint

footprint

物件辨識成果列表

POI編號	2022-09-23	2022-08-19	2022-07-26	2022-06-21	2022-05-31	2022-04-14	2021-11-11
245	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功
442	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功
233	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功	影像匹配成功

點選POI編號

圖層出現footprint日期

足跡位置影像

拍攝當日足跡



58

功能現況---北堤路辨識/PCI評估成果

北堤路辨識(路燈)



PCI評估成果(北堤路)



每10公尺評分一次

教育訓練

1. 活動時間、地點、對象
2. 課程內容
3. 意見回饋

教育訓練---活動時間、地點、對象

• 活動時間地點：

時間:111 年 11 月 9 日(星期三) 10:00-15:00

地點: 國家地震中心13樓

(台北市大安區辛亥路三段200號)



• 參與對象：

交通部運輸研究所港灣技術研究中心、航港局及港務總(分)公司同仁
參加人數40人

大眾運輸

- 站名:地震研究中心
線11
- 站名:南港水庫
294、295、298、611、678、907、6512、線11
- 站名:南港車站
1、207、254、275、275(副站)、275(副站南)、294、611、629、647、650、672、905、905(副)、906、909、致和幹線

自行車

- 從一號線
南山交流道(232K)→建國路(南港)→辛亥路→地震中心
- 從三號線
A橋交流道(20.8K)→建三甲路(台北聯絡道)→辛亥路(平山車道)→基隆路(南港)→地震中心



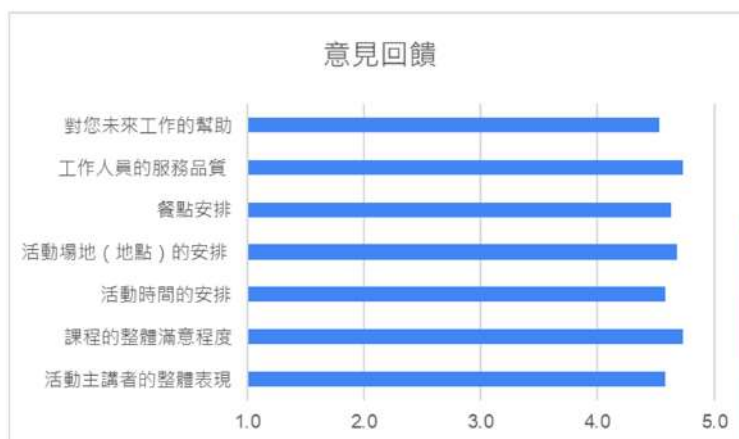
教育訓練議程

上午以技術原理說明為主，下午為實務平台操作以及延伸應用。

時間	活動內容	講者
09:00 - 10:00	人員報到	
10:00 - 10:15	開場與計畫簡章說明	蔡立宏 主任 港灣技術研究中心 韓仁順 教授 國立臺灣大學
10:15 - 12:00	UAV載具分析及飛控邏輯技術	黃春嘉 博士 國立臺灣大學
	無人機影像之智慧化分析	林育鈺 國立臺灣大學
	UAV影像管理與分析平台操作教學	賴建昌 先生
12:00 - 13:00	休息(午餐)	
13:00 - 13:50	數位雙生新興科技介紹	莊威龍 秘書長 數位雙生學會
14:00 - 14:30	智慧港前景國內外分享	甘錫萱 助理 國立臺灣大學
14:30 - 15:00	綜合討論與交流	



意見回饋



平均皆為4分以上

活動剪影



結論

本計畫為期兩年，分別於完成以下工作：

第一年度：

- ✓ 無人機載具及影像感測系統分析
- ✓ 飛行載具控制取向邏輯分析
- ✓ 影像資料蒐集，並建立高精度正射底圖
- ✓ 自動化影像三維建構與空間資訊賦予
- ✓ 系統平台建構
- ✓ 物件自動化偵測，為第二年度測試模型可行性
- ✓ 教育訓練

後續建議：

- 持續蒐集樣本以擴大樣本數供AI模型訓練
- 逐步拓展其他標的物，增加未來效益
- 平台設計符合實際操作者需求

達到自動化管理之效益



第二年度：

- ✓ 新式感測器可應用性評估及應用，並蒐集巡檢資料
- ✓ UAV載具分析及飛控邏輯技術，可依據不同任務類型進行路線規劃
- ✓ 無人機影像之智慧化分析，自動辨識中突堤標的物並進行多時期比對
- ✓ 平台相關功能建置
- ✓ 教育訓練



交通部運輸研究所港灣技術研究中心

感謝聆聽
敬請指教

AI

國立臺灣大學
National Taiwan University

66