

中華民國地籍測量學會期刊

國土測繪與空間資訊

Taiwan Journal of Geoinformatics

第十三卷 第二期

中華民國一十四年七月



VOLUME 13, NO. 2

July 2025

Published by Chinese Society of Cadastral Survey &
National Land Surveying and Mapping Center



內政部國土測繪中心共同發行

中華民國地籍測量學會第22屆組織表

1.理事會

理 事 長：楊名

副理事長：史天元

常務理事：蕭輔導、高書屏、江渾欽

理 事：曾耀賢、洪本善、劉正倫、駱旭琛、紀聰吉、王啟鋒、邱仲銘、周天穎、白敏思、邱俊榮、
邱式鴻、王定平、梁崇智、陳國華、李文聖、吳相忠

秘 書 長：梁旭文（兼任）

副秘書長：陳鶴欽（兼任）

秘 書：黃華尉（兼任）、何依屏（兼任）、謝博丞（兼任）

幹 事：何美娟（兼任）

2.監事會

常務監事：崔國強

監 事：陳典熙、蕭介峰、徐百輝、洪榮宏

3.服務委員會（設委員5-9人，幹事2-4人）

主任委員：王啟鋒

委 員：王定平、黃仰澤、邱俊榮、張瑞隆、劉正倫、黃建華、李文聖、吳智維

幹 事：陳俊德

4.編輯委員會（設委員7-11人，總編輯1人，編輯2-4人）

主任委員：陳國華

委 員：史天元、林士淵、曾子榜、曾國欣、張智安、景國恩、蕭宇伸、儲豐宥、韓仁毓、陳惠玲

總 編 輯：周天穎

編 輯：洪翎嘉、葉美伶、周廷柔

5.研究發展委員會（設委員7-11人，總幹事1人，幹事2-4人）

主任委員：高書屏

委 員：王宏仁、林登建、吳宗寶、吳聲鴻、黃文華、賴偉君、駱旭琛、蕭萬禧、謝福勝

總 幹 事：秘書處兼辦

幹 事：李孟娟

6.獎章審查委員會（設委員5-7人，幹事1-2人）

主任委員：蕭輔導

委 員：張元旭、曾清涼、曾國鈞、謝福來、劉正倫

幹 事：秘書處兼辦

7.教育訓練委員會（設委員5-7人，總幹事1人，幹事1-2人）

主任委員：崔國強

委 員：吳宗寶、李文聖、黃建華、陳俊達、林登建、蕭介峰

總 幹 事：蕭泰中

幹 事：林以恆

8.國際事務委員會（設委員4-7人，總幹事1人，幹事2-4人）

主任委員：周天穎

委 員：盧鄂生、王聖鐸、陳惠玲、朱上岸、黃建華、高書屏

總 幹 事：葉美伶

幹 事：邱明全、陳家卉

9.界址鑑定及諮詢委員會（設委員13-21人，總幹事1人，幹事1-3人）

主任委員：盧鄂生

委 員：邱仲銘、洪本善、謝福勝、王啟鋒、駱旭琛、吳宗寶、吳相忠、梁崇智、黃玉鐘、劉育儒、
杜仲楹、李志宏

總 幹 事：王建得

學會地址：408台中市南屯區黎明路二段335巷28號

網 址：<http://www.cadastralsurvey.org.tw>

電子郵件：cscs.editor@gmail.com

手機內建 GNSS 運用 RTK 技術於建物傾斜監測之可行性研究

林修國^{1*} 高偉翔² 張晏維³

論文收件日期：114.03.21

論文修改日期：114.06.25

論文接受日期：114.06.26

摘 要

近年來都市更新造成的鄰宅倒塌或受損事件頻傳，這些事件發生前，受災住戶幾乎都反應過地板、天花板或牆壁裂縫的問題，但苦於無科學性的資料驗證，均不受建商或相關監察單位採納，若能提供公分等級精度的測量成果，應可減少這類嚴重事件的發生。本研究應用 Google Pixel 7 pro 的內建 GNSS 原始觀測量資料及 A-RTK APP 於建物頂樓即時進行 RTK 定位，並以 10 分鐘之觀測量以成功 Fix 的解答平均值視為當時之坐標值，並於兩週內不同時段進行定位分析定位之精度。得到重覆性精度於 N、E、H 方向分別為 0.006、0.012 與 0.031 公尺。根據技師公會規範傾斜率大於 1/200 房屋有安全疑慮，以 5 樓建物樓高 3.2 公尺，女兒牆 1 公尺高來估算，高度約為 17 公尺，0.085 公尺為 1/200，使用手機進行即時動態定位（RTK）具有早期偵測建物傾斜的能力。

關鍵詞：手機 RTK、建物傾斜監測

^{1*} 副教授，國立臺灣海洋大學，通訊與導航工程學。

² 碩士，國立臺灣海洋大學，通訊與導航工程學系。

³ 大學生，國立臺灣海洋大學，通訊與導航工程學系。

* 通訊作者，TEL: (02)24622192 #7222，E-mail: sglin7222@gmail.com。

Feasibility Study on the Application of Smartphone-Embedded GNSS with RTK Technology for Building Tilt Monitoring

Shiou-Gwo Lin^{1*}, Wei-Hsiang Kao², Yen-Wei Chang³

Abstract

In recent years, incidents of neighboring houses collapsing or being damaged due to urban renewal projects have become increasingly frequent. Before these incidents occurred, affected residents almost always reported issues such as cracks in floors, ceilings, or walls. However, due to the lack of scientific data validation, these concerns were consistently disregarded by construction companies or relevant supervisory authorities. If measurement results with centimeter-level precision could be provided, it should be possible to reduce the occurrence of such serious incidents. This study utilized the built-in GNSS raw observation data and an app on the Google Pixel 7 Pro to perform real-time RTK positioning on the top floor of a building. The coordinate value was determined as the average of the successfully fixed solutions from 10 minutes of observation data. Positioning was conducted at different times over five days to analyze the precision of the positioning. The repeatability precision was found to be 0.006, 0.012, and 0.031 meters in the North, East, and Height directions, respectively. According to the Engineers Association's regulations, a building with a tilt rate greater than 1/200 raises safety concerns. For a five-story building with each floor at 3.2 meters high and a parapet wall of 1 meter, the total height is approximately 17 meters. A tilt of 1/200 corresponds to 0.085 meters. Using a smartphone for rapid static positioning demonstrates the capability to detect building tilt at an early stage.

Keywords: Building Tilt Monitoring, Mobile Phone RTK

^{1*} Associate Professor, Department of Communications, Navigation & Control Engineering, National Taiwan Ocean University.

² Master, Department of Communications, Navigation & Control Engineering, National Taiwan Ocean University

³ College Student, Department of Communications, Navigation & Control Engineering, National Taiwan Ocean University

* Corresponding Author, , TEL: +886-2-24622192 #7222, E-mail: sglin7222@gmail.com

一、研究背景與目的

(一)計畫緣起與背景

全球導航衛星系統 (GNSS) 技術近年來在消費型電子市場中扮演關鍵角色，尤其在智慧型手機的導航應用上，定位精度需求日益提高。隨著自動駕駛、擴增實境 (AR)、精準農業等高精度應用的興起，傳統單點定位 (SPP) 的 3 - 5 公尺誤差已無法滿足需求，促使手機製造商與晶片供應商加速發展高精度 GNSS 技術。

為推動開放式高精度定位發展，Google 自 Android 7.0 起開放 GNSS 原始觀測量 (Raw Measurements) 存取權限，並於 Android 10 強制要求支援載波相位 (Carrier Phase)、偽距 (Pseudorange)、都卜勒 (Doppler) 等數據輸出 (Android Developers, 2025)。目前，市售 Android 手機已有超過 90% 支援此功能，詳細支援清單可參考 [Android GNSS 官方支援列表] (<https://developer.android.com/guide/topics/sensors/gnss>)。

在硬體發展方面，博通 (Broadcom) 於 2017 年推出首款商用雙頻 GNSS 晶片 BCM47755 (<https://www.broadcom.com/products/wireless/gnss-gps-socs/bcm47755>)，支援 L1/L5 頻段 及多星系 (GPS、Galileo、BeiDou、QZSS) 訊號接收。2018 年後，包括小米 8、Samsung Galaxy S9 等旗艦機型陸續採用該晶片，使消費級手機具備高精度定位潛力。然而，受限於手機天線設計、時鐘穩定性及環境干擾等因素，其觀測品質仍遠低於專業測量設備，影響即時動態定位 (RTK) 的穩定性與可靠性。

近年研究顯示，智慧型手機 GNSS 觀測量存在明顯的訊號衰減與雜訊問題。例如：

1. 載噪比 (C/N₀) 較低：G. Li 與 J. Geng (2019) 曾說明相較大地測量接收機，手機 GNSS 訊號平均低 10–15 dB-Hz。
2. 仰角加權模型不適用：根據 R. Gao, L. Xu, B. Zhang, 與 T. Liu (2021) 傳統基於衛星仰角的觀測量加權方式在手機上表現不佳，反而 C/N₀ 比起仰角更適合作為手機觀測量的加權指標。
3. 動態定位挑戰：Lei Guo 等人 (2021) 使用小米 8 錄製雙頻觀測量做進一步的分析，並驗證 Android API 所提供的其他參數是否能運用在定位模型中，最終在短基線實驗下達到了公分等級的定位結果。

上述研究結果指出，手機雖硬體先天不利，但藉由觀測資料處理、加權模型修正與演算法改進，仍可在特定條件下實現高精度定位表現。

(二)研究目的

基於上述背景，本研究旨在開發適用於智慧型手機的高精度 GNSS 定位技術，並探討其在防災監測領域的應用潛力。具體目標如下：

1. 建立手機 GNSS 觀測量處理流程

(1) 解析 Android API 輸出的原始數據(載波相位、偽距、都卜勒)，轉換為 RTKLIB 等開源軟體相容格式。

2. 改進高精度定位演算法

(1) 引入以 C/N_0 為核心的觀測量加權與衛星選擇策略。

(2) 實作部分模糊度解算 (Partial Ambiguity Resolution, PAR)，提升動態環境下的固定率 (Fix Rate)。

3. 驗證建物傾斜監測應用可行性

(1) 開發 Web 即時監控儀表板，整合時序分析與異常預警功能，達成毫米級變形監測。

預期貢獻：

(1) 實證消費級智慧型手機 GNSS 觀測量於 RTK 高精度應用之可行性。

(2) 提供一套低成本、可量化精度之智慧防災定位架構，降低建物傾斜災害監測門檻。

(3) 推動原始 GNSS 觀測資料於行動裝置之應用場景擴展，作為未來精準地理資訊應用之基礎。

(三)裝置選擇與初步觀測評估

為本研究能穩定進行原始觀測資料的收集與即時解算，初期針對市售 Android 裝置中支援 GNSS 原始觀測數據 (Raw Measurements) 者進行功能與穩定性評估，重點比較 Samsung 與 Google Pixel 系列。實測結果顯示，Samsung 台灣市場版本 (如 S20、S21 Ultra 等) 雖硬體上支援雙頻 GNSS 晶片，實際輸出的原始載波觀測資料仍不穩定，且常因廠商鎖定軟體層或 API 限制，造成 RTK 定位難以進行。

相較之下，Google Pixel 系列自 Pixel 4 起即廣泛支援 GNSS 原始觀測資料，並獲多篇學術研究驗證其載波相位穩定性與觀測品質，例如：在 RTK 演算法應用、觀測品質分析與多星系追蹤等研究領域皆有實證成果。綜合實測與文獻結果，本研究選定 Pixel 7 Pro 作為實驗裝置，不僅具備穩定輸出的雙頻 GNSS 晶片，亦支援

載波觀測與原始測量 API 之完整功能，最適合用於本研究探討之 RTK 解算與監測應用。

二、理論基礎

本章節將依序介紹 Android GNSS 觀測量計算與針對 Android 手機所修正的定位演算法。

(一)Android GNSS原始觀測量

1. Android GNSS 觀測量 API

Google 於 2016 年 Android 7 (API 24)開始支援 GNSS 原始觀測量，並規定 Android 10 (API 29)以上版本的裝置必須支援 GNSS 原始觀測量的輸出，截至目前為止已經超過 90%的現有 Android 手機都具備原始測量結果。但每支手機中 GNSS 晶片不同，所提供的觀測量不一定會包含載波相位和都卜勒觀測量，本篇選用包含所有觀測量種類的 Google Pixel 7 Pro 作為開發與實驗手機。

Android 與感應器的互動是透過 API（應用程式介面）來實現的，而 Android 的不同版本通常也代表著 API 的版本更新。而 GNSS 的觀測數據是經由 Android 的 Location API 獲取的。在 Android 7（API 24）之前，該 API 只允許開發人員執行有限的操作，例如啟動或關閉 GNSS 晶片以及取得 NMEA 資訊。至於其他功能，如單顆衛星的數據或定位演算法的選擇，則完全由 GNSS 晶片內部自行處理，開發人員無法通過 API 取得或修改。

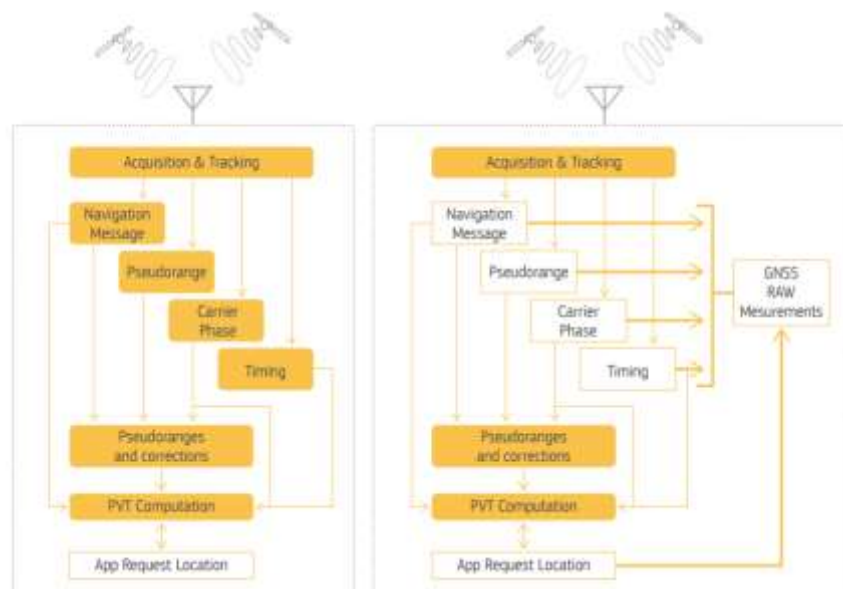


圖 1 左邊為 Android 7 前，右邊為 Android 7 後的 Location API (Android Developers, 2025)

在 Android 7 發布時，Location API 進行了大幅更新，新增了 GNSS 時鐘、GNSS 觀測量和 GNSS 導航訊息等功能。這次更新讓開發人員能夠利用這些資料

計算包括虛擬距離、載波相位以及多普勒效應等觀測量。其中，GNSS 時鐘包含接收端的接收時間與時鐘偏差，而 GNSS 觀測量則涵蓋各衛星的時間信息及其他數據。表 1 列出了常用參數及其描述，後續章節將基於這些參數進行觀測量的計算。

表 1 Location API 中常用參數

參數	描述
<i>TimeNanos</i>	GNSS 接收器的內部硬體時鐘值
<i>TimeOffsetNanos</i>	取得進行測量的時間偏移(以奈秒為單位)
<i>FullBiasNanos</i>	<i>TimeNanos</i> 與真實 GPS 時間的區別
<i>BiasNanos</i>	內部硬體時鐘的亞奈秒偏差
<i>State</i>	衛星狀態標記
<i>ReceivedSvTimeNanos</i>	在測量時間接收到的 GNSS 衛星時間
<i>AccumulatedDeltaRangeMeters</i>	累計增量距離
<i>AccumulatedDeltaRangeState</i>	累計增量距離的狀態標記
<i>PseudorangeRateMetersPerSecond</i>	虛擬距離速率
<i>Cn0DbHz</i>	載噪比 (以 dB-Hz 為單位)

2. 虛擬距離觀測量估算

由於 Location API 無法直接提供各衛星的虛擬距離觀測量，因此開發人員必須自行處理原始觀測數據，將其轉換為常用的虛擬距離觀測量。虛擬距離觀測量是利用衛星信號的時間差乘以光速計算而得。首先，我們需要取得手機接收到衛星信號的時間。本小節將直接採用 Location API 提供的參數名稱進行描述，方便後續開發人員能更加直觀地理解和應用。

$$t_{Rx} = \text{TimeNanos} - (\text{FullBiasNanos} + \text{BiasNanos}) \quad (1)$$

其中， t_{Rx} 為 GPST 上的接收時間(單位為奈秒)。要使用不同星系的觀測量時，因為各星系的時間系統不同，需要將時間差補上，透過(1)式，可以將不同星系的時間系統進行同步：

$$t_{Rx} = \text{TimeNanos} + \text{TimeOffsetNanos} - (\text{FullBiasNanos} + \text{BiasNanos}) \quad (2)$$

其中TimeOffsetNanos為 GNSS 晶片輸出的各觀測量時鐘偏差。

在獲取接收時間後，還需要取得衛星的傳送時間。傳送時間可以通過參數 *ReceivedSvTimeNanos* 獲得，但需要注意的是，該參數所提供的時間系統基於各星系專屬的時間系統。因此，我們可以根據公式 (2) 提到的各系統時間偏差進行補償，確保計算中所有時間系統保持一致，並統一以 GPST 為基準。以下將列出以 GPST、BDT 和 GLONASST 時間系統為基礎的訊號，如何轉換為 GPST 系統的傳送時間。

GPST

$$t_{Tx} = \text{ReceivedSvTimeNanos}[\text{ns}] \quad (3)$$

BDT-GPST

$$t_{Tx} = \text{ReceivedSvTimeNanos}[\text{ns}] + 14[\text{s}] \quad (4)$$

GLONASST-GPST

$$t_{Tx} = \text{ReceivedSvTimeNanos}[\text{ns}] + \text{DoW}[\text{s}] - 3[\text{h}] + \text{leap}[\text{s}] \quad (5)$$

其中：

DoW：一週內第幾天(sec)

leap：閏秒。

得出各星系以 GPST 為標準的傳送時間後，我們只需將其與接收時間相減並乘上光速即可得出虛擬距離觀測量，如下：

$$P^s = c(t_{Tx}^s - t_{Rx}) \quad (6)$$

此外，Location API 有提供個衛星的訊號同步狀態 State，該參數會進一步解釋當前 ReceivedSvTimeNanos 參數所代表的精度，開發人員可根據 State 參數判斷觀測量的可用性。

3. 載波相位與都卜勒觀測量估算

載波相位觀測量的轉換公式如下：

$$\phi_f^s = \text{AccumulatedDeltaRangeMeters} / \lambda_f \quad (7)$$

其中， λ_f 為該衛星於 f 頻段上的波長。在進行載波相位觀測量轉換前，需要確認是否有包含可用的 AccumulatedDeltaRangeState 標記。

都卜勒觀測量的轉換公式如下：

$$D_{i,f}^s = \text{PseudorangeRateMetersPerSecond} / \lambda_f \quad (8)$$

在進行 API 回傳值的載波相位與都卜勒觀測量轉換時，不同於虛擬距離觀測量，不需考慮星系的時間問題，因為這些觀測量與時間系統無關。

(二) 核心定位程式

RTKLIB 是由東京大學的學者 Tomoji Takasu(2009)發佈的開源 RTK (Real-Time Kinematic) 定位軟體。RTKLIB 是一個強大的全球導航衛星系統 (GNSS) 工具，能夠接收和處理多種類型的觀測數據，包括接收機獨立交換格式 (Receiver Independent Exchange Format, RINEX)、海事服務無線電技術委員會 (Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM) 以及各種接收機的原始觀測數據格式。

Takasu 最新的版本是於 2020 年 12 月 29 日發布的 2.4.3 b34 版。許多研究者基於該版本進行了 fork，開發出自己的版本。本研究選用的是 rtklibexplorer 發布的 demo5 b34h 版本，該版本針對低成本的單頻和雙頻接收機進行了優化，特別是針對 u-blox 接收機。此外，b34h 版本開始支持北斗三代衛星的觀測數據。本研究主要關注 RTKLIB 中的 RTK 演算法，並加入部分未定值求解技術，以使其能夠應用於手機的即時 RTK 定位。

1. 未定值求解 LAMBDA

本研究以 Tenuissen(1995)提出的 LAMBDA 理論為基礎進行未定值求解。然而，RTKLIB 採用地面一次差分模式，因此在求解前後皆增加額外的轉換將估計值組合成二次差分週波未定值，並於求解後將固定解轉換回地面一次差中，二次差分的組成和固定解轉換公式如下：

$$y_i = B_i^1 - B_i^n \quad (9)$$

$$B_i^n = B_i^1 - \hat{y}_i \quad (10)$$

其中：

下標 i 代表頻段 i；上標代表第 n 個衛星

y_i ：浮點解二次差分週波未定值

$\hat{y}_i$ ：固定解二次差分週波未定值。

完整流程圖如下：

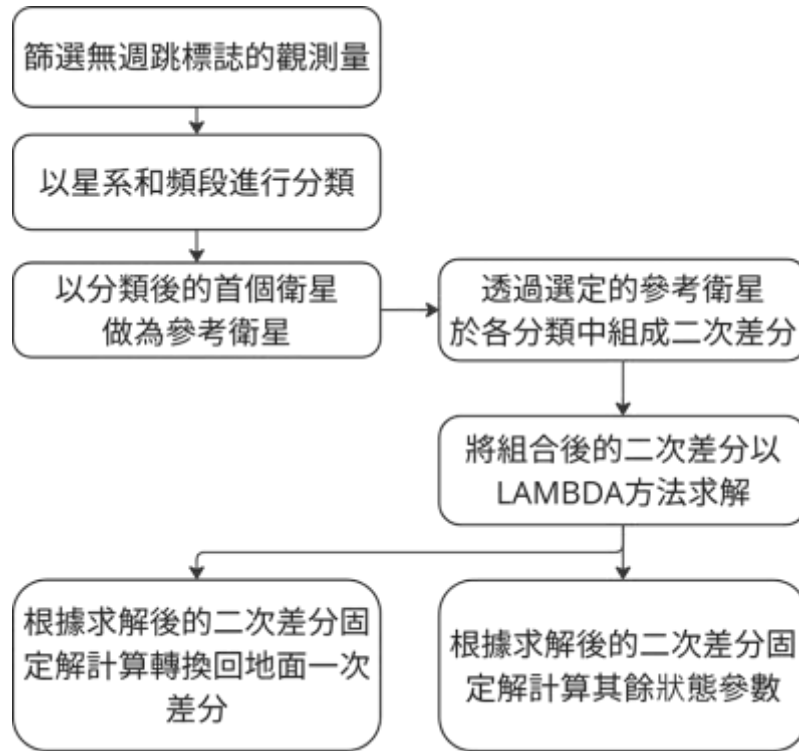


圖 2 LAMBDA 求解流程

2. 部分未定值求解

通常並不需求解出所有觀測量的週波未定值才能達到期望的精度，只需要對部分相對重要的觀測量進行求解即可，此方法稱為部分未定值求解 (Partial Ambiguity Resolution, PAR)。這個方法的好處在於對於手機這種雜訊較大的 GNSS 觀測量可以避開一些誤差過大導致未定直求解失敗的情形。Teunissen(1998,1999)提出式(11)來描述 PAR 的理論基礎：

$$P_s = \prod_{i=1}^n \left(2\Phi\left(\frac{1}{2\sigma_{\hat{a}_{i|I}}}\right) - 1 \right) \quad (11)$$

其中：

n ：未定值數量

$\Phi(\cdot)$ ：累計分佈函數

$\sigma_{\hat{a}_{i|I}}$ ：是第 i 個未定值的估計值，並以求出 $I = \{1, \dots, (i-1)\}$ 個未定值為條件。

由該公式可見，整體成功率是根據各個單獨成功率的乘積，因此求解越多的未定值會降低整體的成功率。然而，如果選取過少的未定值可能會造成錯解發生，而

選取過多則會無法達成比值檢測。因此，如何選擇未定值的子集合將是一個重要的問題。

在選取未定值子集合前，本研究會先透過多種方法對觀測量進行檢測，以確認是否有週波脫落的情形發生。其中包含以下三種，接收機提供的 LLI 標誌、都普勒與相位觀測量間的比對和無幾何觀測量(L1、L5)時序變化比對。接著，透過觀測量載噪比(CN0)和未定值連續求解成功的次數進行權重計算，並根據計算後的權重選出測試子集。權重計算方式如下：

$$w_{i,f} = CN0_{i,f} + CN0_{bias,f} + w_{lock} \times Lock \quad (12)$$

其中：

$CN0_{i,f}$ ：觀測量 i 於 f 頻段的載噪比

$CN0_{bias,f}$ ：f 频段與 L1 頻段的差值

w_{lock} ：未定值連續求解成功的係數

$Lock$ ：未定值連續求解成功的次數。

由於各频段觀測量的平均 CN0 不同，因此為了確保不同频段間的權重比能以同樣的基準進行比較，本研究將手機 L1 與 L5 間 $CN0_{bias,f}$ 設為 3， w_{lock} 設為 5。完整的流程圖如下：

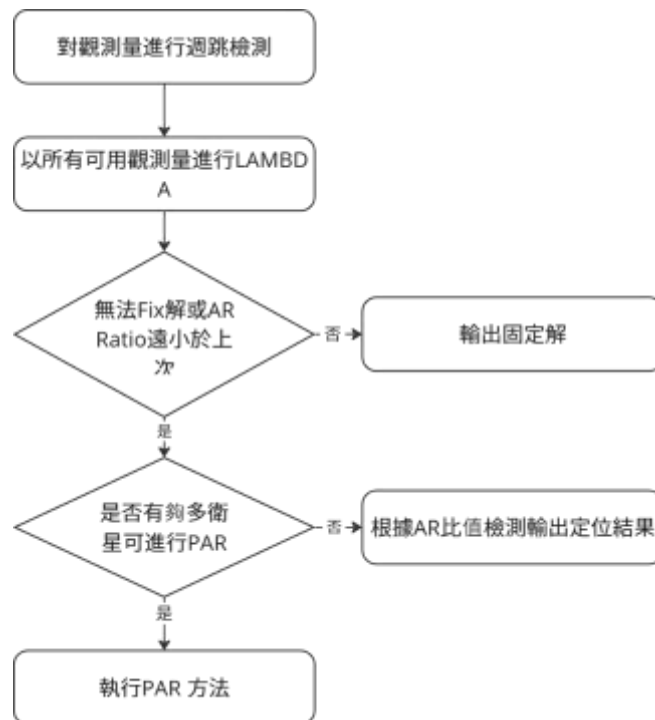


圖 3 完整週波未定值求解流程

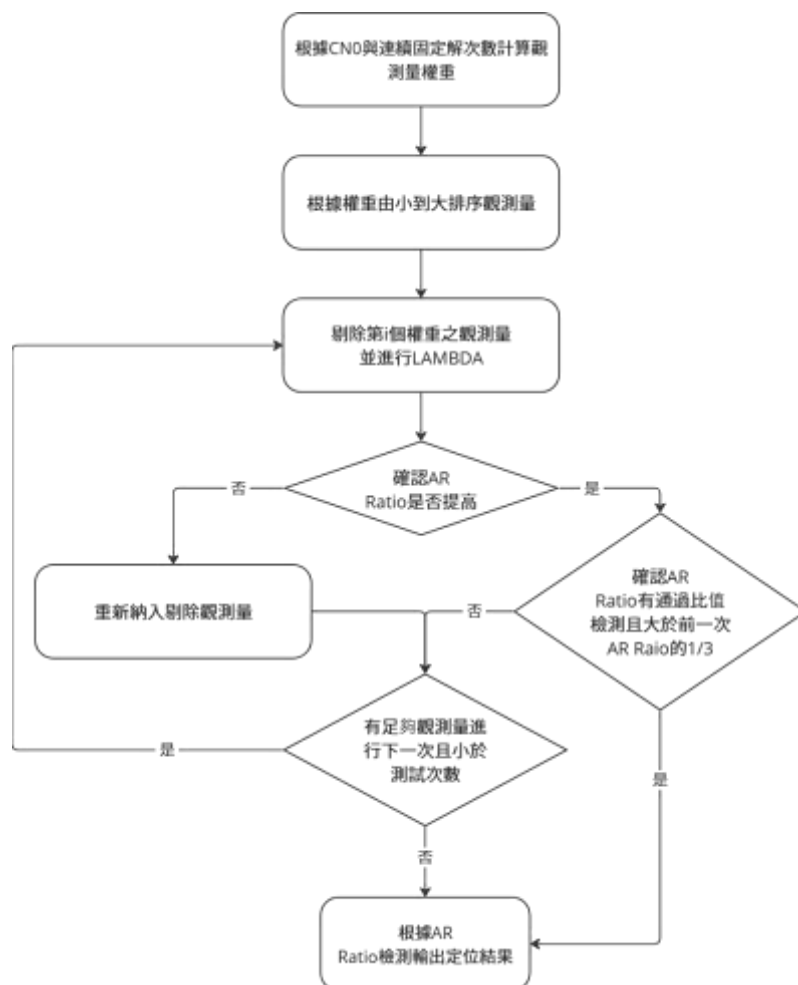


圖 4 部分未定值求解流程

圖中的測試次數本研究設為 3 次，且當前一次無法進行 LAMBDA 解的話則將測試次數乘 2，最高會達到 6 次。

3. 擴展卡爾曼濾波器

擴展卡爾曼濾波器（Extended Kalman Filter, EKF）是一種常用於處理非線性系統的濾波技術，可視為經典卡爾曼濾波器（Kalman Filter, KF）在非線性情況下的延伸。EKF 主要透過兩個階段來遞迴估計系統狀態：預測（Prediction）與更新（Update）。

在預測階段，EKF 使用非線性的狀態轉移函數來根據前一時刻的狀態預測當前狀態，並透過狀態轉移矩陣（State Transition Matrix）進行線性化處理，以計算狀態估計的協方差。在更新階段，則利用觀測模型（Measurement Model）將當前的量測資料與預測值進行比較，再根據量測模型對預測結果進行修正，同樣會在線性化後使用量測矩陣更新狀態與協方差。

EKF 的系統狀態模型和量測模型如下：

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1}, w_k \sim N(0, Q_k) \quad (13)$$

$$z_k = h(x_k) + v_k, v_k \sim N(0, R_k) \quad (14)$$

其中， x_k 為 k 時刻的狀態向量； u_k 為 k 時刻的控制向量； w_k 為 k 時刻的狀態雜訊，視為高斯白雜訊； Q_k 為 k 時刻的狀態協方差矩陣； $f(\cdot)$ 為非線性狀態轉移函數； z_k 為 k 時刻的觀測量向量； v_k 為 k 時刻的觀測量雜訊，同視為高斯白雜訊； R_k 為 k 時刻的觀測量協方差矩陣； $h(\cdot)$ 為非線性之量測函數。

本研究所採用之狀態模型 $\mathbf{x}$ 與狀態協方差矩陣 $\mathbf{Q}$ 定義如下：

$$\mathbf{x} = [p_x \ p_y \ p_z \ v_x \ v_y \ v_z \ a_x \ a_y \ a_z \ B_1 \ B_2 \ B_5]^T \in \mathcal{R}^{(9+3m) \times 1} \quad (15)$$

其中， p_x, p_y, p_z 為 ECEF 坐標系上移動站位置(m)； v_x, v_y, v_z 為 ECEF 坐標系上移動站速度(m/s)； a_x, a_y, a_z 為 ECEF 坐標系上移動站加速度(m/s^2)； B_1, B_2, B_5 為所有衛星於三個頻段上的地面一次差分(cycles)。

本研究採用地面一次差分代替二次差分的週波未定值作為狀態向量中的參數，這樣可以免除計算中需特別考慮參考衛星更換的問題。 B_i 的定義如下：

$$B_i = [N_{ur,i}^1 \ N_{ur,i}^2 \ \cdots \ N_{ur,i}^m]^T \quad (16)$$

其中，上標為第幾顆衛星；下標 u 為移動站； r 為主站； i 為頻段； N_{ur} ：地面一次差分的週波未定值(cycles)； m 為所支援的最大衛星數（例如 GPS 32 顆 + Galileo 36 顆）。

對應的狀態協方差矩陣(Q)如下：

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{a,3 \times 3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_B^2 I_{3m} \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中， Q_a 為加速度系統變異數，以 ENU 坐標系表示平面和高度雜訊； σ_B^2 為週波未定值系統變異數。

本研究所採用之量測模型 z 與量測協方差矩陣 R 定義如下：

$$z = [\Phi_1 \quad \Phi_2 \quad \Phi_5 \quad P_1 \quad P_2 \quad P_5]^T \in \mathcal{R}^{(6n) \times 1} \quad (18)$$

$$\Phi_i = [\Phi_{ur,i}^{12} \quad \Phi_{ur,i}^{13} \quad \cdots \quad \Phi_{ur,i}^{1n}]^T, P_i = [P_{ur,i}^{12} \quad P_{ur,i}^{13} \quad \cdots \quad P_{ur,i}^{1n}]^T \quad (19)$$

其中，上標的數字為第幾顆衛星；下標 1, 2, 5 為頻段； n 代表該次運算移動站與參考站共同衛星數量； Φ_i ：載波相位觀測量於 i 頻段的二次差分； P_i ：虛擬距離觀測量於 i 頻段的二次差分。

對應的量測協方差矩陣(R)是由觀測量的載躁比(C/N_0)組成，雖然在 GNSS 定位中通常使用衛星仰角進行加權，但 G. Li 與 J. Geng,(2019)；R. Gao, L. Xu, B. Zhang, 與 T. Liu(2021)發表，手機的觀測量更依賴於 C/N_0 而不是仰角。具體計算方式如下：

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{P,1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{P,2}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{P,5}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\Phi,1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\Phi,2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\Phi,5}^2 \end{bmatrix}_{6n \times 6n} \quad (20)$$

$$\sigma_{P|\Phi,f}^2 = \sigma_{P|\Phi,f}^{s2} + \sigma_{P|\Phi,f}^{q2} \quad (21)$$

$$\sigma_{P|\Phi,f}^s = f_{P|\Phi,f}^2(\sigma_{base}^2 + \sigma_{CN0}^2) \quad (22)$$

$$\sigma_{CN0}^2 = a_0^2(10^{(CN0_u - CN0_{max})/10} + 10^{(CN0_r - CN0_{max})/10}) \quad (23)$$

其中， $\sigma_{P|\Phi,f}^2$ 為地面一次差組成的方差； $f_{P|\Phi,f}^2$ 為不同訊號間的方差係數； σ_{base}^2 為固定噪聲； σ_{CN0}^2 為載噪比計算的方差； a_0^2 為 CN0 誤差項係數； $CN0_{u|r}$ 為移動站/主站 CN0 值； $CN0_{max}$ 為 CN0 最大值。

三、實驗結果與分析

本章節介紹使用的 APP(A-RTK)、實驗與成果分析。

(一)實驗用A-RTK介紹

A-RTK 運用手機 Andriod Location API 所提供之原始觀測量進行即時轉換，並與演算法結合，使手機能進行 RTK 定位並即時顯示當前定位資料。應用程式由使用者介面、資料串流和定位演算法三個部分組成。使用者介面使用 Kotlin 編寫，提供使用者設定主站連線和其他運行參數。資料串流部分使用 Java 編寫，負責資料轉換和將演算法計算完的結果傳遞至使用者介面。定位演算法則維持原本 RTKLIB 所使用的 C 語言編寫，將接收到的手機 GNSS 觀測量和主站觀測量進行相對定位解算，得出該時刻的定位結果。整體架構如圖 5 所示。APP 實際畫面如圖 6 所示。



圖 5 APP 結構



圖 6 左為資料流設定 右為即時定位畫面

APP 定位演算法流程如圖 7 所示。由於 Android 手機並未直接提供虛擬距離觀測量、相位觀測量和都卜勒觀測量等數據，將 Android Location API 提供的原始觀測量進行轉換。接者，以該時刻的觀測量進行單點定位，並將結果作為擴展卡爾曼濾波(EKF)的初值。然後，將轉換後的手機觀測量與主站觀測量透過差分模式進行差分計算，已獲得觀測量殘差，並用於 EKF 的狀態更新。最後，根據狀態矩陣中的浮點週波未定值，使用部分未定值求解技術進行未定值解算，從而得出最終的高精度定位結果。

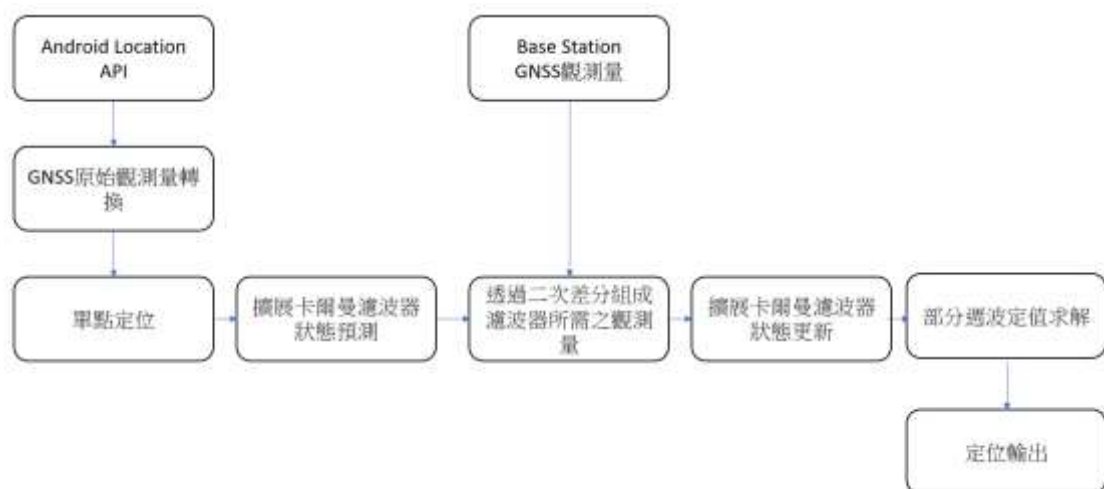


圖 7 定位流程圖

(二)實驗設備與規劃

本研究使用以下設備進行測量：

表 2 實驗設備與規劃

項目	說明
測量設備	Google Pixel 7 Pro (內建雙頻 L1/L5 GNSS 模組，支援原始觀測資料輸出)
主站接收器型號	Septentrio mosaic-x5 (支援多星系、雙頻 RTK 定位)
主站天線型號	Ardusimple 三頻天線
基線距離	約 43.45 公尺 (主站至移動站之距離)
觀測頻段	L1 / L5 雙頻觀測
測量地點	國立臺灣海洋大學延平技術大樓 11 樓天台，實驗手機架設於冷氣機櫃上方，保持水平方向，附近空曠，對空條件良好
遮蔽狀況說明	主站設於無遮蔽屋頂平台，可全天候全方位追星；移動站(Pixel 7 Pro)置於天台邊緣，東側與南側可視角完整，西側略有欄杆，實測對 Fix 成功率影響有限；所有實驗排除明顯遮蔽、確保穩定對空品質。



圖 8 實驗現場圖

測量時間安排：每日測量固定時段（如下午 2:00-5:00），確保數據的連續性。

數據收集方式：每次測量到測量狀態 GPS Fix 後再持續 5-10 分鐘，確保數據穩定。

數據篩選標準如下：

1. 選取單次測量有 300 筆固定解成果
2. 設定標準差閾值，剔除異常數據(東距標準差 $\leq 0.03(\text{m})$ 北距標準差 $\leq 0.03(\text{m})$ 高度標準差 $\leq 0.09(\text{m})$)

分析方法：計算位移量與傾斜率。

根據多日測量結果，統計測試數據如下：

表 3 RTK 定位成果

日期	時間 (UTC)	固定 解數	固定 解比 例	東距平均 (m)	北距平均 (m)	高度平 均 (m)	東距標 準差 (m)	北距標 準差 (m)	高度 標準 差 (m)
2025/ 2/26	07:38 ~ 07:48	360	61.12 %	328389.673	2782522.033	64.338	0.003	0.003	0.005
2025/ 2/27	07:56 ~ 08:11	371	41.64 %	328389.651	2782522.019	64.325	0.004	0.008	0.012
2025/ 2/28	07:11 ~ 07:25	713	88.35 %	328389.672	2782522.029	64.367	0.004	0.003	0.012
2025/ 2/28	07:25 ~ 07:38	644	83.75 %	328389.679	2782522.018	64.365	0.005	0.014	0.02
2025/ 2/28	07:39 ~ 07:49	424	49.30 %	328389.686	2782522.019	64.343	0.006	0.005	0.011
2025/ 2/28	08:05 ~ 08:23	418	24.39 %	328389.683	2782522.013	64.341	0.008	0.015	0.035
2025/ 2/28	08:34 ~ 08:59	773	51.81 %	328389.665	2782522.029	64.31	0.006	0.005	0.015
2025/ 3/1	06:16 ~ 06:32	851	89.48 %	328389.683	2782522.03	64.363	0.007	0.005	0.018
2025/ 3/1	06:33 ~ 06:45	658	92.42 %	328389.667	2782522.019	64.42	0.01	0.012	0.047
2025/ 3/1	06:45 ~ 07:02	839	66.64 %	328389.653	2782522.026	64.397	0.019	0.012	0.028
2025/ 3/4	06:15 ~ 06:25	523	91.59 %	328389.679	2782522.022	64.395	0.004	0.004	0.01
2025/ 3/12	10:33 ~ 10:45	612	88.06 %	328389.578	2782522.064	64.416	0.002	0.005	0.01
2025/ 3/13	04:41 ~ 05:12	899	47.87 %	328389.666	2782522.023	64.333	0.01	0.011	0.024
2025/ 3/14	06:38 ~ 06:48	466	78.32 %	328389.657	2782522.039	64.336	0.008	0.007	0.031
2025/ 3/17	05:40 ~ 05:57	923	90.05 %	328389.67	2782522.035	64.38	0.007	0.005	0.014

從表 2 中可觀察到，除 3 月 12 號外，定位精度在平面方向約為 1cm，高程方向約為 1~3cm，符合 RTK 一般測量預期。3 月 12 號資料或許有半波長的問題或者儀器架設不當。但以時間序列分析時，可視為離群值去除。另外，值得討論的是，固定解的比值，固定解的比例指的是固定解的數量與全部資料量的比值。固定解代表解算出的整數模糊度成功固定，因此其定位結果通常具有較高的精度。由於實驗區域開闊，這個比值較一般測量型的接收器來說，有明顯的劣勢。也就是說，用手機進行快速靜態測量可能需要較長的觀測時間，才能獲得穩定且精準的定位結果。

(三)傾斜率與傾斜趨勢計算

在實驗中，我們通過計算水平位移和傾斜率來評估建築物的傾斜情況。以下是詳細的計算方法和傾斜趨勢分析：

1. 水平位移計算：

水平位移是通過比較當前測量點與初始測量點在東距（E）和北距（N）的坐標變化來計算的。公式如下：

$$\text{水平位移} = \sqrt{(E_i - E_0)^2 + (N_i - N_0)^2} \quad (24)$$

2. 傾斜率計算：

傾斜率是水平位移與建築物高度的比值，用於評估建築物的傾斜程度。公式如下：

$$\text{傾斜率} = \frac{\text{水平位移}(\text{displacement})}{\text{建築物高度}(h)} \quad (25)$$

其中，建築物高度 $h = H_{\text{測量}} - H_{\text{地面}} (27.772(m))$

3. 傾斜趨勢計算：

單看傾斜率可知訊息較少，所以我們在以每次測量點的 ENh 平均值，通過比較當前測量點與初始測量點在東距(E)、北距(N)、高程(H)的位移，計算且分析東距位移（E_Displace）、北距位移（N_Displace）和高程位移（H_Displace）的變化來評估建築物的傾斜方向和趨勢。

(1). 傾斜方向角度（azimuth of displacement）：

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\text{北距位移}}{\text{東距位移}}\right) \quad (26)$$

可標示傾斜主方向為東北、東南等。

(2). 位移比值作為趨勢指標：

$$\text{傾斜趨勢指標} = \frac{\text{水平位移}}{\text{高程位移}} \quad (27)$$

此方式應僅於高程變化非零時引用（避免除以零），可輔助判斷偏移是否具地基下陷（H↓）傾向。

表 4 位移數據(m)

日期	時間	東距位移	北距位移	高程位移	水平位移	傾斜率
2025/2/26	07:38 ~ 07:48	0	0	0	0.000	0.000%
2025/2/27	07:56 ~ 08:11	-0.022	-0.014	-0.013	0.026	0.071%
2025/2/28	07:11 ~ 07:25	-0.001	-0.004	0.03	0.004	0.011%
2025/2/28	07:25 ~ 07:38	0.006	-0.015	0.027	0.016	0.044%
2025/2/28	07:39 ~ 07:49	0.013	-0.014	0.005	0.019	0.052%
2025/2/28	08:05 ~ 08:23	0.01	-0.02	0.003	0.022	0.061%
2025/2/28	08:34 ~ 08:59	-0.008	-0.004	-0.028	0.009	0.024%
2025/3/1	06:16 ~ 06:32	0.01	-0.003	0.025	0.010	0.029%
2025/3/1	06:33 ~ 06:45	-0.006	-0.014	0.082	0.015	0.042%
2025/3/1	06:45 ~ 07:02	-0.02	-0.007	0.059	0.021	0.058%
2025/3/4	06:15 ~ 06:25	0.006	-0.011	0.057	0.013	0.034%
2025/3/12	10:33 ~ 10:45	-0.095	0.031	0.078	0.100	0.273%
2025/3/13	04:41 ~ 05:12	-0.007	-0.01	-0.005	0.012	0.033%
2025/3/14	06:38 ~ 06:48	-0.016	0.006	-0.002	0.017	0.047%
2025/3/17	05:40 ~ 05:57	-0.003	0.002	0.043	0.004	0.010%

透過每日平均 ENh 值與第一天進行相減，得到位移量，並以建築物高度計算傾斜率。從結果中可以看出，多數時間的水平位移變化極小（多落在 0.01 ~ 0.03 m 之間），對應傾斜率大約在 0.01% ~ 0.07% 間，屬極小範圍。

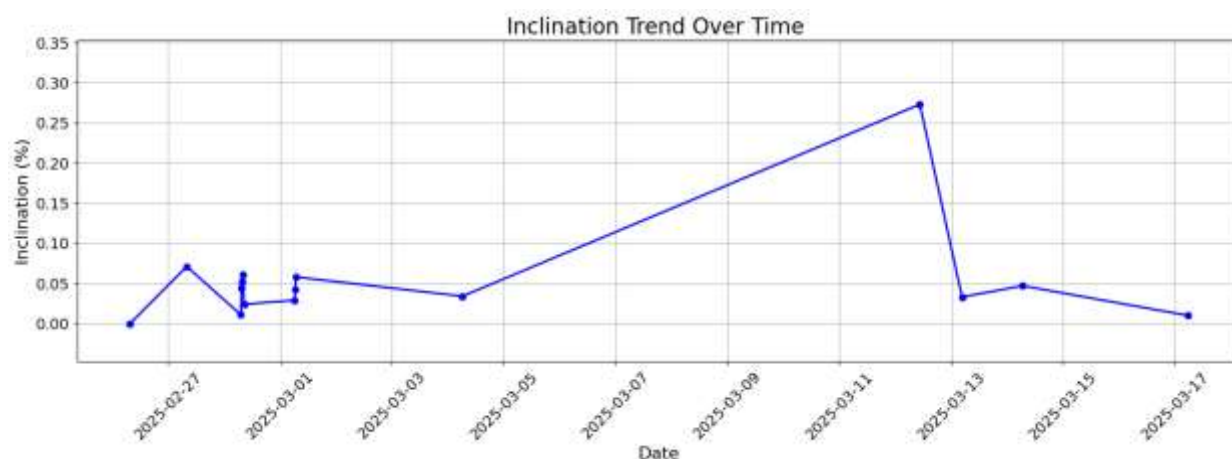


圖 9 傾斜率曲線圖

此圖以時間（X 軸）為基準，繪製每次測量的傾斜率（Y 軸）。

1. 曲線大部分平緩，傾斜率在 0% ~ 0.07% 之間，顯示建築物的穩定性良好。
2. 少數較高點（例如 2025/3/12 傾斜率 0.273% 位移 10cm）顯示該日測量可能含半波長誤差或儀器架設不當。
3. 曲線整體平穩，沒有明顯持續上升或下降的趨勢，代表未有逐日累積傾斜現象。

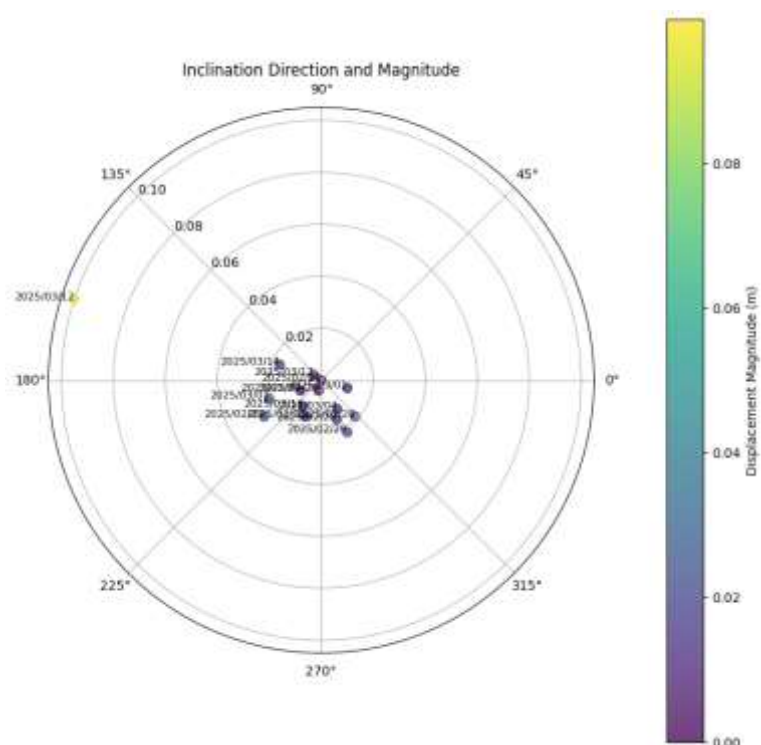


圖 10 傾斜方向與位移量極座標圖

此圖採用極座標方式繪製每日觀測之水平方位移方向與大小，角度表示偏移方向（相對於正東順時針），徑向表示位移大小（單位：公尺），顏色表示位移幅度大小。

1. 多數資料點集中在 0.01–0.03 公尺以內，代表傾斜程度極低。
2. 2025/03/12 出現顯著偏移（約 0.095 公尺，西北方向），考慮可能為架設誤差或異常訊號。
3. 整體方向分布穩定，顯示監測對象在觀測期間未有持續傾斜趨勢，建物結構相對穩定。

(四)結果分析

根據表 4 的多日測量結果與位移分析，本研究進行傾斜趨勢評估，比較不同時間點的水平位移變化，判斷建築物的位移趨勢。例如，若水平位移在某一方向上持續增加，則可能表明建築物在該方向上有輕微的傾斜趨勢。然而，從目前的數據來看，水平位移變化較小，且無明顯的持續趨勢，因此建築物的傾斜趨勢不明顯。

四、結論與展望

利用手機以測量的方式進行 RTK 定位確實可以得到足夠精度，除 3 月 12 號實驗值差異達 10cm 外，定位精度與一般測量設備已經非常接近。但是目前僅有較少

數的手機提供完整的 GNSS 原始觀測量數據(包含電碼以及相位觀測量)。另外，利用手機進行 RTK 定位時，其初始期明顯較測量性 GNSS 接收器來得久，而且產生錯誤解的機率較高，對於觀測環境的要求明顯也比較高。這些特性對於利用手機進行專業的測量工作，似乎仍不適合，但是對於一些民生用途可以接受較長的觀測時間且不是頻繁需要進行的情形下，手機 RTK 仍不失為一個可行的測量工具。舉例來說，像本文這種應用在房屋傾斜監測的情況下就相當適合。目前，作者們正進一步的利用三星、Sony 進行 RTK 定位的開發工作，希望讓 A-RTK APP 能適用的手機更加廣泛。

誌謝

感謝農業部 113 年度農業即時動態定位服務管理應用計畫支持，使本論文得以順利完成。

參考文獻

- Android Developers, 2025, 《Raw GNSS Measurements》, <https://developer.android.com/develop/sensors-and-location/sensors/gnss#supported-devices> (Last Checked 2025/06/10).
- W. Liu, X. Shi, F. Zhu, X. Tao, and F. Wang, 2019, 《Quality analysis of multi-GNSS raw observations and a velocity-aided positioning approach based on smartphones》, *Advances in Space Research*, 63.
- G. Li and J. Geng, 2019, 《Characteristics of raw multi-GNSS measurement error from Google Android smart devices》, *GPS Solutions*, 23(90)
- R. Gao, L. Xu, B. Zhang, and T. Liu, 2021, 《Raw GNSS observations from Android smartphones: characteristics and short-baseline RTK positioning performance》, *Measurement Science and Technology*, 32(8).
- GSA, 2017, 《Using GNSS raw measurements on Android devices (White Paper)》.
- Android Developers, 2025, 《GnssMeasurement》, <https://developer.android.com/reference/android/location/GnssMeasurement> (Last Checked 2025/06/10).
- T. Takasu, 2009, 《RTKLIB: Open Source Program Package for RTK-GPS》, Tokyo.
- IGS/RTCM RINEX Working Group, 2021, 《The Receiver Independent Exchange Format, Version 4.00》.
- RTCM Special Committee, 《RTCM Standard 10403.3; Differential Global Navigation Satellite Systems Services, Version 3》, Washington, DC: RTCM Special Committee.

- rtklibexplorer, 2025, 《RTKLIB》, <https://github.com/rtklibexplorer/RTKLIB/tree/b34h> (Last Checked 2025/06/10).
- P. J. G. Teunissen, 1995, 《The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation》, *Journal of Geodesy*, 70(1–2), pp. 65–82.
- P. J. G. Teunissen, 1998, 《Success probability of integer GPS ambiguity rounding 》, *Journal of Geodesy*, 72(2), pp. 606–612.
- P. J. G. Teunissen, 1999, 《An optimality property of the integer least-squares estimator 》, *Journal of Geodesy*, 73(11), pp. 587–593.
- Android Developers, 2025, 《Publications | Sensors and location | Android Developers》, <https://developer.android.com/develop/sensors-and-location/sensors/publications> (Last Checked 2025/06/19).
- Broadcom, 2025, 《BCM47755》, <https://www.broadcom.com/products/wireless/gnss-gps-socs/bcm47755> (Last Checked 2025/06/20).

多元量測技術應用於桃園大圳及地籍測量圖資結合之研究

黃立信^{1*} 薛世勳²

論文收件日期：114.03.27

論文修改日期：114.06.04

論文接受日期：114.06.26

摘要

桃園大圳工程於民國5年開始施工，民國13年通水，至民國17年全部竣工，通水迄今已逾百年。桃園大圳工程長年以來扮演維繫大桃園地區工商發展及生活機能之大動脈，更是桃園地區最重要的文化資產之一。

桃園大圳通竣百年，至今仍持續運作，但現行位置測量與影像資料，其點位精度均欠缺與現行實施之地籍測量基準作平差校正。本研究嘗試以多元量測技術建立統一的參考標準，對桃園大圳完成嚴密控制測量與影像資料之圖資整合。

本研究依循下列目的進行實驗：1.桃園大圳歷史及地理資訊收集；2. e-GNSS量測水圳控制點位坐標；3.多元量測技術運用於水圳工程資料之建置；4.比對驗證其監測成果；5.套合導水路工程資料於地籍測量成果；6.整合地籍圖資展示。

本研究為首位結合桃園大圳空間資料與地籍圖資之整合建置，其成果確實能顯著提升觀測精度和效率，為未來相關研究和實務操作提供了重要參考，更確立桃園大圳現代化工程之應用與發展。

關鍵詞：地籍測量、多元量測技術、桃園大圳、導水路工程、整合地籍圖資。

¹ 副教授，國防大學理工學院環境資訊及工程學系。

² 碩士，國防大學理工學院環境資訊及工程學系。

*通訊作者，TEL：+886-3-3800364#132，E-mail：shinn0329@gmail.com。

A Study on the Integration of Taoyuan Canal and Cadastral Surveying Map Information by Multiple Measurement Techniques

Lih-Shinn Hwang^{1*} Shi-Mai Xue²

Abstract

Taoyuan Canal has been completed for 100 years and is still in continuous operation. However, the accuracy of the existing positional measurements and image data is not leveled with the current cadastral survey standards. In this study, we attempted to establish a unified reference standard by using multiple measurement techniques, and completed a tightly controlled survey and image data integration for Taoyuan Canal.

The aims of those studies are summarized as follow: 1.Collecting historical and geographic information of the Taoyuan Canal, 2.Using e-GNSS to measure Canal control-point coordinates, 3.Constructing Canal engineering data by Multiple Measurement Techniques, 4.Comparing and verifying the monitoring results, 5.Combination of Headrace Engineering and Cadastral Survey results,6.Displaying integration of Cadastral Map Information.

By integrated map data, the results of this study show that It can indeed significantly improve observation accuracy and efficiency, and provide important reference for future related research and practical operations. It will became the first research to combine headrace engineering and cadastral survey results, and confirm modern engineering application and development of Taoyuan Canal.

Keywords: Cadastral Survey, Headrace Engineering, Integration of Cadastral Map Information, Multiple Measurement Techniques, Taoyuan Canal

¹ Associate Professor, Department of Environmental Information and Engineering, National Defense University, C.C.I.T.

² Master, Department of Environmental Information and Engineering, National Defense University, C.C.I.T

*Corresponding Author, TEL: +886-3-3800364#132, E-mail: shinn0329@gmail.com

一、前言

地籍測量是一種專門針對土地的測量技術，用來確定土地的界線、面積及權屬，其成果對於土地使用規劃及土地權益保障具有重要意義。此外，桃園大圳導水路屬水工構造物中輸水工程的一環，由於桃園臺地地形及地質特性，導水路必須自桃園臺地沖積扇頂的大漢溪引水灌溉整個臺地，其構造包含明渠、暗渠、隧道、開槽及水路橋，途中必須頻繁地穿越不同的地形變化，或是穿過山丘，或是越過河谷，以致傳統地籍測量方法常無法完整描述其實際地位置，僅能以簡單的點位及連線描繪其範圍。過去描述水圳位置的方法通常是以導線測量方式或是工程範圍樁位成果為主，無法準確描述地下水圳完整範圍之絕對坐標位置，水圳位置測量方式須自成一格，與傳統測繪方法大有不同。

台灣目前的地籍測量工作仍以測繪“點”位為主要構建地籍圖資的方式，針對有著連續線形特性的輸水圳路，尚無人能精確描述其空間位置應用於地籍測量作業，隨著測繪儀器製造技術的進步，如何藉由多元空間測量技術及方法精進地籍測量作業是本研究的重要動機。

利用多元測量技術可以快速獲取空間三維資訊，特別適用於可供檢核特徵點稀少的區域。透過全面掃描捕獲點雲數據，再利用控制點進行坐標轉換，相比傳統單點測繪，這種方法能提供更精細和連續的數值測繪結果，滿足各類高精度圖資需求。

此外，現有水圳位置描述方法的不足，特別是傳統測量技術無法精確描述地下水圳的絕對坐標位置，進一步突顯了改進測量技術的必要性。本研究利用先進的3D Light Detection And Ranging(3D LiDAR)地面測量方法，並結合 e-GNSS RTK(Electronic Global Navigation Satellite System Real-Time Kinematic)衛星觀測技術，建立高精度的控制點坐標，轉換至TWD97(Taiwan Datum 1997)坐標系統。這些技術應用不僅提升了測量數據的精度和可靠性，還為地籍測量或工程監測提供了穩定的基礎，進一步提升測量效率和結果的可信度。

民國105年桃園市政府地政局始依日治時代地籍圖實施地籍重測程序，建置數值地籍圖資，於民國111年中興測量始完成桃園大圳首套導水路影像資料，惟兩者量測標準參考不一，點位精度均欠缺與現行地籍控制測量基準作平差校正，本研究試圖嘗試以多元空間資訊技術，建立統一的參考標準，填補兩者在原有測量技術上之缺失，成為台灣第一位結合水圳空間資料建置與地籍測量作業之研究。

二、背景說明

(一) 桃園大圳介紹

桃園大圳通水至今已有百年歷史，對桃園臺地的農業灌溉、工業用水供應以及防洪減災有著重要貢獻。作為台灣水利發展史上的重要設施，桃園大圳對當地經濟、社會和環境發展、維護生態系統及促進生物多樣性起到了關鍵作用。

位於台灣西北部，橫跨新北市、桃園市與新竹縣的桃園大圳，主要從石門水庫引水，灌溉約23,000公頃的農田。其興建背景源於19世紀末至20世紀初台灣總督府因應日益增長的稻米需求，決定開發桃園臺地的農業潛力。由於桃園臺地地勢較高，水資源分配不均，導致農業發展受限。為解決這一問題，日本政府自民國前5年開始測量，並於民國5年動工建設，至民國17年全線完工。

桃園大圳工程涉及隧道、明渠和水橋等結構，其中第三號隧道為當時亞洲最長的隧道。大圳的建設使桃園臺地的旱田轉變為水田，農田生產力大幅提升，水稻田面積從11,809公頃增至23,070公頃。此外，桃園大圳的建立吸引了人口遷入，促進了地方經濟和城鎮的發展。圖1為桃園臺地範圍示意圖。



圖1 桃園臺地範圍示意圖(張齡方，2022)

隨後建成的石門水庫進一步鞏固了大圳的水源供應，使灌溉系統更加完善。桃園大圳作為台灣重要的水利工程之一，其歷史意義和實際效益成為台灣水利發展的重要里程碑。

桃園大圳工程於民國5年開始施工，民國17年完工。全長約42公里，由韓裔日籍技師張令紀負責整體規劃設計，並在施工過程中全程監督，解決了許多技術問題。他於民國6年赴美學習先進技術，進一步改進了大圳工程。雖然他在大圳完工前辭世（民國11年，53歲），但對於桃園大圳工程功不可沒。桃園大圳導水路資料通用迄今已百年，在此期間曾位做過精密點位控制測量及影像資料建置，圖2為日治時代（大正10年，民國10年）對桃園大圳首次繪製之導水路地籍圖，圖上相關資訊均與現狀有極大落差。

桃園大圳包含官設埤圳及組合事業工程，桃園大圳導水路屬官設埤圳工程，包含8段馬蹄形隧道，高寬各約3.6公尺，長15.7公里，水橋5座，明渠11段，共4.58公里。自此接幹線25.3公里；支線12條，共114.7公里；分線6條，共26公里；蓄水池進水線241條，共146公里及小給水路共686公里。

導水路系統總長18公里，分為多段隧道、明渠和水橋。其中，隧道部分全長15,707公尺，分為八段，包括第三號隧道、第四號隧道等。第三號隧道全長4,937公尺，是當時亞洲最長的隧道，其施工面臨多次崩塌和土質鬆軟等挑戰。施工時期，由於當時尚未普及大型土木機械，所有挖掘和建設工作主要依賴人力進行，工人使用簡單的工具逐步挖掘，這在當時是極具挑戰性的工程(張齡方，2022)。

(二) 地籍測量介紹

台灣地籍測量的歷史可追溯至清領時期，劉銘傳於民國前26年實施土地清丈，建立初步的地籍管理系統，解決土地權利混亂與賦稅問題。這些資料成為後續地籍管理的基礎。日治時期，日本政府於民國前13年成立台灣臨時土地調查局，進行全面土地調查和地籍測量，運用當時先進的德國、瑞士和法國技術，奠定了台灣土地管理的堅實基礎。民國35年國民政府接管台灣後，沿用日治時期地籍資料，並進行更新和補充，雖節省成本但也引發後續管理問題。民國64年起，政府推動地籍圖重測計畫，解決早期測量誤差和地籍圖破損等問題，並於民國86年全面數值化地籍圖，提升測量精度和管理效率。傳統地籍測量依賴人工操作和光學儀器，如經緯儀、捲尺或雷射測距儀，測量精度受限。現代測量技術包括GNSS、電子測距儀、全測站經緯儀和光達，精度已達毫米等級，提升了地籍測量的準確性和應用範圍。現代地籍測量工作由政府地政機關與專業測量公司共同完成，透過e-GNSS RTK和無人機測量技術，進一步提高了測量效率。然而，歷史遺留問題仍導致測量誤差和紛爭，未來需持續更新和完善地籍資料，以提升管理的可靠性。



圖 2 桃園大圳導水路日治時代地籍圖(張齡方，2022)

(三) e-GNSS 即時動態定位介紹

e-GNSS 即時動態定位系統(Real-time Kinematic, RTK)是利用全球導航衛星系統

(GNSS)進行即時、高精度的定位技術。該系統整合了多個 GNSS 星座，包括 GPS、GLONASS、Galileo 和 Beidou，以提供更可靠和精確的定位服務。e-GNSS 系統的基本原理是透過雙頻載波相位觀測來改善或減少各種誤差源，例如電離層延遲和對流層延遲，以達到厘米級的定位精度(高書屏，2022)。

e-GNSS 即時動態定位系統的核心技術包括虛擬基準站(Virtual Reference Station, VRS)和即時運算修正參數(Real-time Computation of Correction Parameters)。虛擬基準站技術是透過多個實體基準站的資料來模擬一個虛擬基準站，以提供高精度定位服務，這能有效地改善傳統 RTK 技術中的距離限制問題。

目前，e-GNSS 系統在台灣已經建立了全面的基準站網絡，這些基準站連續接收來自多個衛星的觀測資料，並通過網際網路即時傳輸至控制及計算中心進行處理。控制計算中心負責接收和處理來自基準站的觀測資料，生成修正參數和即時定位資訊，然後傳輸給使用者的移動設備。這些技術的應用和整合，如圖 3 所示，使得 e-GNSS 即時動態定位系統能夠提供高精度、即時的定位服務，並已在多個領域中得到廣泛的應用和認可(鍾岳龍、陳鶴欽，2023)。



圖 3 e-GNSS 即時動態定位 5 大核心定位技術(鍾岳龍、陳鶴欽，2023)

(四) 光達介紹

光達(LiDAR，全名為 Light Detection and Ranging)是一種光學遙感技術，利用雷射脈衝來測量目標的距離及其他參數。光達系統透過發射一束雷射到目標物上，並接收從目標物反射回來的雷射，根據雷射的飛行時間和反射強度來計算出目標物的三維坐標。這項技術廣泛應用於測繪學、考古學、地理學、地貌學、地震學、林業、遙感技術及大氣物理學等領域(蔡欣達，2022)。

光達可在短時間內掃描物體表面獲取大量的三維點資訊，立即建立精確的三維模型，依照光達使用的方式，目前可以分為空載光達(Airborne Laser Scanner, ALS)、車載光達(Mobile Laser Scanner, MLS)、地面光達(Terrestrial Laser Scanner, TLS)及手

持光達(Hand-held Laser scanner, HLS)等四類，如表 1 所示，本研究係使用地面光達為實驗工具。

地面光達系統固定於地面上，通過腳架設置並以固定掃描角度對目標物進行測量，其特點是產出精度高且數據豐富的點雲資料，地面光達的架設位置固定，這使得在測量特定目標區時，必須不斷重複架設、測量和移動的動作。因此，若要進行大範圍區域的測量，效率會較低(陳泓錡，2012)。而每種地面光達其實皆有不同的掃描方式，但由於地面光達為固定架設，沒有因移動而產生的動態解算誤差，產出之資料點雲最為大量而穩定。

表 1 各式光達比較表

測量工具	點雲密度 (平方公尺)	限制	持有成本	測量範圍
空載光達	約 1~20 點	點雲過於稀疏難以用於路面平整分析	高	大範圍
車載光達	約 2,000~5000 點	需有平坦道路供車輛行駛	中	中範圍
地面光達	約 10,000 點 以上	因固定儀器位置難以量測目標全區	低	小範圍
手持光達	約 1,000~3000 點	須依靠操作者移動，掃描範圍較小且精度較差。	最低	最小

三、研究方法

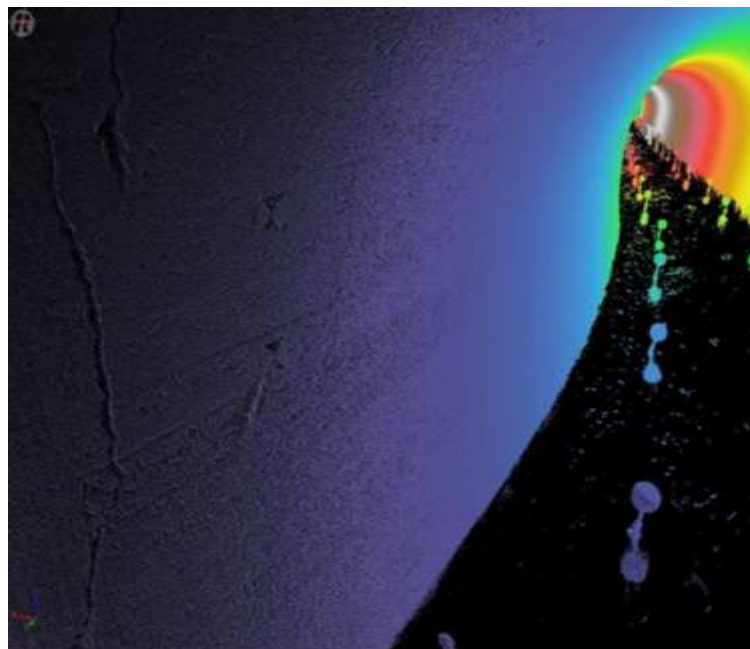
(一) 研究區域

桃園大圳的導水路系統是台灣歷史上重要的水利工程之一，主要目的是解決桃園台地的灌溉問題，提高農業生產力。導水路系統始於大漢溪上游的石門地區，設有進水井和引水閘門，這些設施用來控制進水量並確保水源穩定。本研究擇定桃園大圳導水路「新號隧道」(黎明工程顧問股份有限公司，1996)(為符合統一編號系統和現代管理需求，隧道名稱已由改制後農業部農田水利署桃園管理處修正為3-2號隧道)及前後部分明渠段，位置示意圖如圖4，合計約200公尺長導水路進行實驗，實驗區域包含隧道段、加蓋明渠及未加蓋明渠等水圳形式，包含3種主要導水路構造形式。

農業部農田水利署桃園管理處於民國 111 年委託桃園市政府地政局及中興測量公司辦理桃園大圳導水路位置地籍預為分割及隧道襯砌表面掃描作業，當時中興測量公司以光達測繪方式掃描整個 3-2 號隧(圖 5)道並於進出口處設置共 6 個斷面永久參考點(圖 6)，本研究將套合其參考點坐標成果驗證比對該成果之差異。



圖四 桃園大圳3-2隧道位置套繪示意圖(黎明工程顧問股份有限公司，1996)



圖五 中興測量掃描成果(黎明工程顧問股份有限公司，1996)



圖 6 永久參考點示意圖(黎明工程顧問股份有限公司，1996)

(二) 實驗設備及軟體介紹

1. 衛星接收儀

本研究所使用儀器為 Leica GS18，如圖 7 所示，GS18 接收儀使用 Leica RTKplus 和 SmartLink 技術，支援即時動態定位，定位精度達到厘米級 (<https://www.highrise.com.tw/>)。



圖 7 Leica GS18 GNSS 衛星接收儀(<https://www.highrise.com.tw/>)

操作系統採用 Leica Captivate software，並配有 Leica CS20 控制器。記憶體容量為 8GB。供電方面，外接電源為 12 VDC，內建鋰電池可支援長達 7 小時的操作時間。更可多增加解算的機率及減短接收的時間外，亦可節省許多外業作業時間，Leica GS18 GNSS 衛星接收儀基本性能規格如表 2 所示。

表 2 Leica GS18 衛星接收儀基本性能規格表

(<https://www.highrise.com.tw/>)

型號	Leica GS18	
支援衛星	GPS、GLONASS、BeiDou、GALILEO 及 QZSS	
頻道	GPS:L1,L2,L2C,L5 GLONASS:L1, L2,L2C,L3 Galileo:E1,E5a,E5b,AltBOC,E6 BeiDou(COMPASS):B1I,B1C,B2I,B2a,B3I QZSS:L1,L2,L5,L6 SBAS:WAAS,EGNOS,MSAS,GAGAN	
定位精度	RTK	平面精度:0.008m+0.5ppmRMS
		高程精度:0.015m+0.5ppmRMS
	靜態	平面精度:0.003m+0.1ppmRMS
		高程精度:0.0035m+0.4ppmRMS

軟體部分利用內政部國土測繪中心開發之「衛星測量基線網形平差系統」blNET（圖8），該程式具備多項特性。能夠處理大規模的基線網形平差計算。程式具有自由網平差功能，平差後自動產生cmp檔，縮短執行時間。

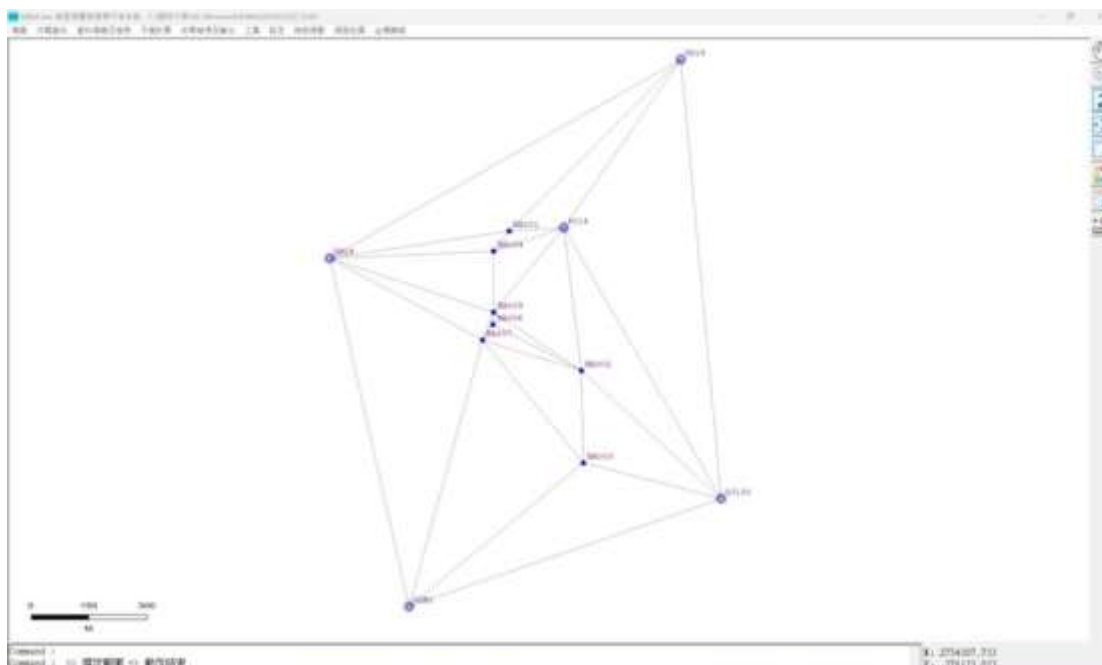


圖 8 blNET 軟體視窗畫面示意圖

2. 3D 雷射掃描儀器

本研究使用之之三維雷射掃描儀硬軟體設備為RIEGL VZ-1000（如圖9），主要針對需要高速掃描而設計，擁有高速的雷射掃描、快速及高精度的訊號處理，以及

多樣高速的資料傳輸介面(RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GmbH, 2015)。
RIEGL VZ-1000雷射掃描儀規格如表3所示。



圖 9 RIEGL VZ-1000 三維雷射掃描儀(RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GmbH, 2015)

表 3 RIEGL VZ-1000 雷射掃描儀規格表(RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GmbH, 2015)

儀器型號	RIEGL VZ-1000	
掃描模式	長距(RL)	高速(HS)
測距範圍	1,400 公尺	450 公尺
光束參數	70kHz	300kHz
掃描速度	29,000 點/秒	122,000 點/秒
重量	9.6 公斤	
內建記憶體	32G	
最大掃描角 (垂直/水平)	100 度/360 度	
掃描測距精度	5 公厘	
雷射發射頻率	5 段	
相機	外接式高階數位相機	

本研究所使用之軟體係由原廠奧地利 RIEGL 所開發之軟體 Riscan Pro，主要是處理外業所掃描之點雲資料。開啟 RiScan Pro 軟體後，整個操作介面將分為四大區

塊：工具列、掃描資料處理區、物件屬性視窗及指令區。

(三) 中興測量成果

農業部農田水利署桃園管理處於民國 111 年度辦理桃園大圳導水路資料建置計畫，委託中興測量有限公司，透過 3D 掃描、資料庫建置和整併，以保存對隧道結構的穩定性和安全性情形之紀錄(行政院農業委員會農田水利署桃園管理處，2022)。

1. 計畫內容

計畫辦理範圍為桃園大圳導水路全線涵蓋隧道及幹線部分，排除民國 110 年度計畫案已執行三號隧道範圍約 5 公里，計畫全長約 13 公里，圖 10。中興測量公司進行控制點坐標測設後，使用自研移動式載具，搭配全斷面雷射掃描儀(德國 Zoller Fröhlich 公司製造的 Z+FProfiler 9012)進行掃描作業。



圖 10 民國 111 年度桃園大圳導水路資料建置計畫工作範圍示意圖(行政院，2022)

2. 報告分析

中興測量公司於桃園大圳三號隧道採單站式地面光達方法施測，侷於工作期限及停水時間限制(水圳最多連續停水三天)，其餘部分則採用測繪車方式加速完成掃描工作，惟相較於三號隧道單站式地面光達點雲坐標系統轉換成果，測繪車點雲成果(圖 11)易受隧道內部地面顛簸影響，其位置成果較不及三號隧，成果嚴謹。

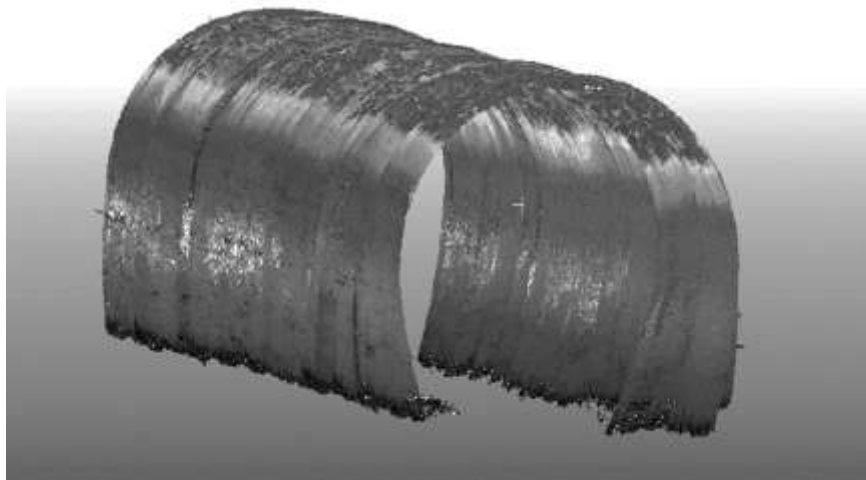


圖 11 中興測量公司點雲成果(行政院，2022)

(四) 研究方法

本研究結合多元測量技術，以 e-GNSS RTK 衛星觀測(Leica GS18)方式，建立附合於公告地籍坐標系統(TWD97)之控制點，供 3D LiDAR 地面測量之依據。並透過 3D LiDAR 地面測量(RIEGL VZ-1000)方法，分析比對光達點雲精度，再透過坐標轉換，計算點雲絕對坐標位置成果，建立桃園大圳導水路絕對位置監測之基礎，以分析比對既有測繪成果及圖資。

1. 衛星觀測

按內政部國土測繪中心頒布「採用電子化全球衛星即時動態定位系統辦理控制測量作業手冊」(2021)所載測量方法，並以國土測繪中心「控制測量網形平差程式」計算控制測量成果，適用於應用測量作業測設控制點使用。參照該手冊相關作業方法及規範，新設控制點間可獲得對應之相對精度，亦可作為檢測作業參考使用。表 4 為 e-GNSS 即時動態定位坐標成果檢核表。

表 4 e-GNSS 即時動態定位坐標成果檢核表

觀測資料	各測回觀測資料固定(Fixed)解坐標筆數 ≥ 180 筆
各點位中誤差	$\sigma_N \leq 20 \text{ mm}$ $\sigma_E \leq 20 \text{ mm}$ $\sigma_h \leq 50 \text{ mm}$
粗差偵錯	依常態分布 99%信心區間進行粗差偵錯，剔除大於 3 倍中誤差之時刻坐標。 2 測回坐標平面較差 $\leq 20 \text{ mm}$ ，高程較差 $\leq 50 \text{ mm}$

2. 基線網計算

本研究動態測量控制點坐標係使用國土測繪中心「衛星測量基線網形平差程式」(blNET)進行計算，其計算方法係包含將動態測量控制點坐標成果作最小約制網形平差計算和強制附合網形平差計算。計算完成後，須產生強制附合平差基線精度成果報表檔，檢視成果是否符合基線相對精度參考表，若有不符規範的基線應分析原因及評估影響程度，適當辦理補測或重新計算。這些步驟確保了測量成果的精度和可靠性，適合各種需要高精度測量的應用場合。

3. 點雲拼接

點雲拼接的原理在於將不同位置、角度或時間拍攝的點雲數據結合成一個完整的三維模型。點雲需要拼接的原因在於單一位置或角度的掃描範圍有限，無法覆蓋整個目標物體的所有細節，通過多次掃描並拼接可以得到更完整、更高精度的三維數據。這個過程通常需要找到不同點雲之間的重疊區域，並確定它們之間的相對位置和方向。拼接的目標是使得點雲之間的誤差最小化，以得到高精度的三維模型。五種常見的點雲拼接方法如下：1.共軛轉換法面、2.磁性規標控制點法、3.測站後視稜鏡法、4.曲面匹配法、5.測站共軛球法(黃立信、張嘉倫、邱建華、王建文，2019)。

本研究目的在測取通水隧道的空間位置，因通水隧道中地形地物特徵性質過低，且隧道內常年通水，不易設置定著規標，故本研究採用共軛球法為拼接方式。

四、研究成果與分析

本研究的動機源於現有水圳位置描述方法的不足，傳統地籍測量無法準確描述地下水圳的絕對坐標位置，即便在地籍圖重測作業後，其地籍圖資已轉換為 TWD97 坐標系統，但地下構造物位置仍難以證實其真實位置。本研究透過多元量測方法，建立桃園大圳導水路絕對位置監測的基礎，並與既有測繪成果進行比較。藉以驗證本研究成果可滿足高精度圖資需求，進一步提升地籍測量的精度和效率。

(一) 控制測量

表 5 民國 112 年 10 月 19 日已知點衛星觀測結果檢核報表

編號	點號	最小約制 N(m)	最小約制 E(m)	已知點 N(m)	已知點 E(m)	dN (m)	dE (m)
1	4014	2753851.302	278151.886	2753851.254	278151.881	-0.048	-0.005
2	GD18	2754284.945	278452.495	2754284.908	278452.508	-0.037	0.013
3	GGB1	2752873.773	277752.547	2752873.773	277752.547	-0.000	0.000
4	GJ130	2753151.579	278556.820	2753151.530	278556.820	-0.049	0.000
5	GM24	2753772.504	277548.873	2753772.466	277548.868	-0.038	-0.005
	平均					-0.034	0.001

表 6 民國 113 年 3 月 5 日已知控制點衛星觀測結果檢核報表

編號	點號	最小約制 N(m)	最小約制 E(m)	已知點 N(m)	已知點 E(m)	dN(m)	dE(m)
1	4014	2753851.265	278151.876	2753851.254	278151.881	-0.011	0.005
2	GD18	2754284.921	278452.487	2754284.908	278452.508	-0.013	0.021
3	GGB1	2752873.755	277752.536	2752873.773	277752.547	0.018	0.011
4	GJ130	2753151.545	278556.810	2753151.530	278556.820	-0.015	0.010
5	GM24	2753772.466	277548.868	2753772.466	277548.868	-0.000	0.000
	平均					-0.004	0.009

本研究依據內政部國土測繪中心規範，利用 e-GNSS RTK 技術建立符合 TWD97 坐標系統的控制點，作為 3D LiDAR 測量基準。於民國 112 年 10 月 19 日及 113 年 3 月 5 日使用 e-GNSS RTK 衛星觀測技術進行第 2 次檢測，以獲取控制點的精確坐標，2 次觀測數據的最小約制成果如表 5 及表 6 皆符合手冊規定，對比 2 次觀測結果，計算控制點的精度和可靠性。檢核結果顯示，所有控制點的坐標均符合規範要求，確保了坐標轉換成果的準確性。

本研究區位於桃園大溪區齋明寺以東與三元一街路側之間（如圖示紅色線條位置），周邊原有加密控制點 GD18 等 5 點，藉以 e-GNSS RTK 衛星觀測方式於導水路周邊適當地點新設 BA001 等 7 點控制點圖 12，可覆蓋研究區範圍，亦可避免控制點測算成果有外差情形發生。



圖 12 研究區位置及周邊控制點分布略圖

表 7 控制點及圖根點坐標表

點號	N(m)	E(m)	h(m)	備註
BA004	2753789.761	277970.471	145.034	南端入口
BA005	2753632.437	277970.268	145.287	北端出口
BA006	2753601.599	277968.848	145.295	南端入口
BB001	2753791.080	277965.346	145.080	北端出口
BB002	2753753.777	277964.998	144.210	北端出口
BB003	2753598.026	277953.214	145.528	南端入口

本研究於民國 112 年 10 月 19 日及民國 113 年 3 月 5 日等 2 次衛星觀測，並將 2 次控制點衛星觀測網形平差成果互為檢核，其各方向較差，均符合作業手冊之規定。本研究以民國 112 年 10 月 19 日的第一次控制測量成果為基礎，再以傳統全測站經緯儀(Trimble S8)延伸測設隧道點雲坐標轉換所需圖根點坐標，計有北端隧道出口兩點(BB001 及 BB002)，南端隧道入口一點(BB003)，最後以北端隧道口 BA004、BB001 及 BB002 與南端隧道口 BA005、BA006 及 BB003 等六點（坐標成果如表

7)，為下一章節本研究點雲坐標轉換之依據。

(二) 水圳工程資料建置

本研究分別於南北兩端水圳隧道口適當位置設置控制點及共軛球固定座，利用停水期間以 3D 雷射掃描儀施測水圳內部。隧道內部於南端及北端洞門位置旁，設有永久測量參考點各三點，本研究測繪其空間位置並將其轉換為絕對坐標，以利後續成果比較及分析。

1. 第一次 3D 雷射掃描

第一次實驗時間民國 112 年 12 月 11 日，本次掃描共計 14 站，總點雲數為 261,473,697，拼接精度為 0.0057(m)。圖 13 為第一次掃描各測站拼接誤差分布圖。

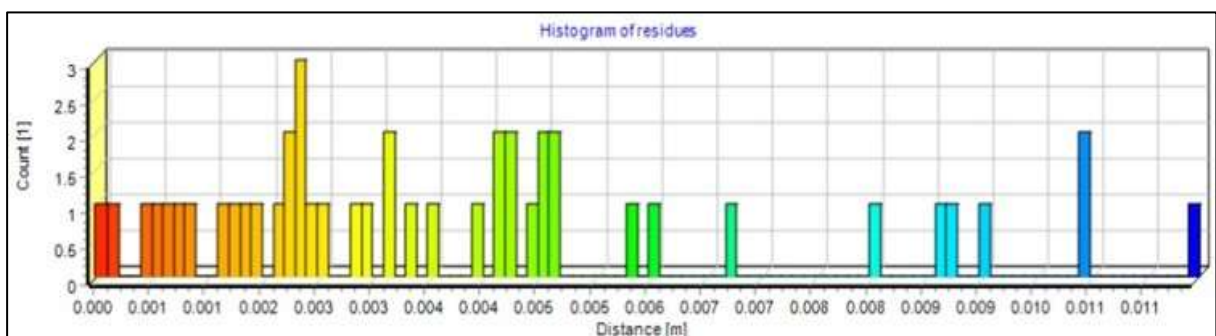


圖 13 第一次掃描各測站拼接誤差分布圖

2. 第二次 3D 雷射掃描

第二次實驗時間民國 113 年 1 月 19 日，本次掃描共計 14 站，總點雲數為 263,709,441，拼接精度為 0.0036(m)。圖 14 第二次掃描各測站拼接誤差分布圖。

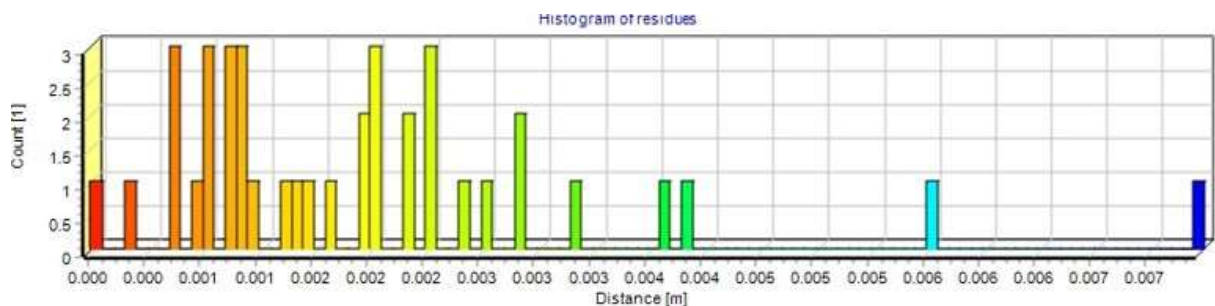


圖 14 第二次掃描各測站拼接誤差分布圖

兩次作業經比對轉換後參考點坐標，南端入口 ΔN 平均值為 -0.017(m)、 ΔE 平均值為 0.038(m)，如表 8 所示，北端出口 ΔN 平均值為 0.015(m)、 ΔE 平均值為 0.024(m)，如表 9 所示。兩表較差成果均符合地籍測量實施規則(內政部，2023)第 73 條，戶地測量採數值法測繪者，其位置最大誤差為六公分之規定，確可作為地籍圖資套繪作業之依據。

表 8 南端入口永久參考點第一測回與第二測回掃描成果之比較

點號	N(m)	E(m)	$\Delta N(m)$	$\Delta E(m)$
001_S1	2753652.673	277962.895	-0.022	0.041
002_S1	2753652.695	277962.854		
001_S2	2753652.695	277962.922	-0.011	0.037
002_S2	2753652.706	277962.885		
001_S3	2753651.829	277959.897	-0.017	0.035
002_S3	2753651.846	277959.862		
平均			-0.017	0.038

表 9 北端出口永久參考點第一測回與第二測回掃描成果之比較

點號	N(m)	E(m)	$\Delta N(m)$	$\Delta E(m)$
001_N1	2753742.891	277960.623	0.017	0.025
002_N1	2753742.874	277960.598		
001_N2	2753742.840	277960.676	0.025	0.023
002_N2	2753742.815	277960.653		
001_N3	2753743.665	277957.634	0.002	0.023
002_N3	2753743.663	277957.611		
平均			0.015	0.024

(三) 中興測量資料比對分析

農業部農田水利署桃園管理處於民國 111 年委託中興測量公司辦理桃園大圳導水路資料建置計畫，其計畫內容包含斷面永久參考點規標設置(參考點坐標成果如表 10)與位置測量、隧道襯砌影像掃描等，本文藉由測繪相同參考點位置，以比較驗證前後期成果之異同。本研究第一次掃描成果南端參考點坐標較差之 ΔN 平均值為 0.154 公尺、 ΔE 平均值為 0.010 公尺，北端參考點坐標較差之 ΔN 平均值為 0.118 公尺、 ΔE 平均值為 0.037 公尺。第二次掃描成果南端參考點坐標較差之 ΔN 平均值為 0.171 公尺、 ΔE 平均值為 -0.028 公尺，北端參考點坐標較差之 ΔN 平均值為 0.104 公尺、 ΔE 平均值為 0.014 公尺。中興測量公司曾於 3 號隧道實施單站式地面光達掃描作業，有別於本文比對之 3-2 號隧道推車式光達作業方式，故本研究比對結果略有落差。

表 10 隧道內永久參考點坐標成果

點號	N(m)	E(m)
S1	2753652.536	277962.916
S2	2753652.523	277962.884
S3	2753651.675	277959.885
N1	2753742.772	277960.583
N2	2753742.717	277960.641
N3	2753743.552	277957.597

本研究因 3-2 號隧道測區兼具明渠、加蓋明渠及隧道部分，兼具導水路主要構造樣態，故初始即選擇以該場域作為實驗區，但本團隊於民國 113 年 3 月得到農業部農田水利署桃園管理處提供之中興測量數據，始得知中興測量測區僅有三號隧道實施嚴密控制測量，其餘部分皆為車軌光達之掃描成果，因受限於人力、物力、場域及桃園大圳停水時間之限制，本研究無法再對三號隧道進行重製。

(四) 套合地籍測量成果

本研究再將點雲掃描成果與農業部農田水利署桃園管理處於民國 111 年委託桃園市政府地政局辦理桃園大圳導水路位置地籍預為分割作業成果（圖 15）比對，本研究為進一步確認本研究成果與實際地測成果間之較差，故選定部分導水路固定牆面位置，萃取其平面坐標展繪於重測系統並比較其平面位置與原有測量成果之較差。經比較其結果均符地籍測量實施規則第 73 條規定 (<https://www.land.moi.gov.tw/law/chhtml/>)。

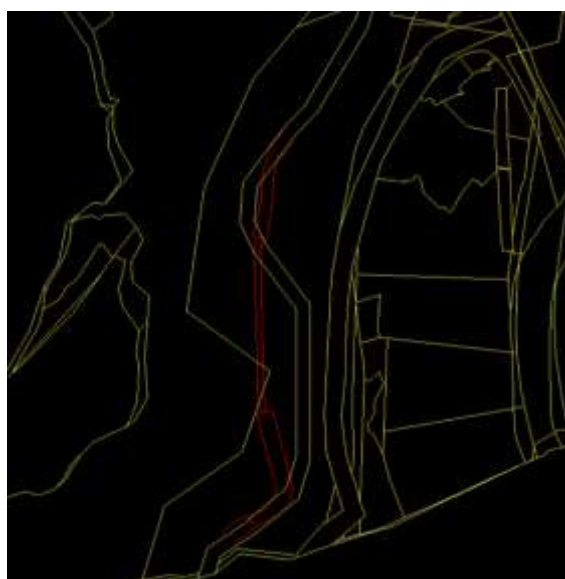


圖 15 3-2 號隧道預為分割成果示意圖



圖 16 資料比對位置點雲成果示意圖

選定部分導水路固定牆面位置如下述，圖 16，A 處：北端明渠蓋板樑側。B 處：北端隧道洞門。C 處：南端明渠蓋板樑側。D 處：南端明渠蓋板樑側。經比對四處（圖 16）本研究 3D 點雲萃取出平面坐標成果與 111 年桃園市政府辦理之桃園大圳導水路地籍預為分割作業實地測繪成果，A 處 4 個點位垂距較差分別為：0.013(m)、0.013(m)、0.011(m)及 0.007(m)。B 處 7 個點位垂距較差分別為：0.008(m)、0.010(m)、0.029(m)、0.001(m)、0.008(m)、0.015(m)及 0.025(m)。C 處 4 個點位垂距較差：0.028(m)、0.006(m)、0.032(m)及 0.032(m)。D 處 4 個點位垂距較差：0.019(m)、0.002(m)、0.016(m)及 0.054(m)，點雲轉換後坐標成果與實測點位置較差均小於 2 至 6 公分，符合地籍測量實施規則之規定。

(五) 整合地籍圖資



圖 17 3-2 號隧道附近 105 年地籍圖重測成果

桃園大圳 3-2 隧道位於大溪區隆德段範圍內，該地段於 105 年辦理地籍圖重測作業，地籍圖重測成果如圖 17 所示，其水路位置之重測成果，是以相鄰實地地上物位置，參照套繪重測前地籍圖推定而成，與實地地下水圳位置是否相符尚無直接測量成果可供參考。

1. 整合重測後數值地籍圖

本研究萃取轉換後具絕對坐標之水圳及隧道 3D 點雲成果最寬範圍，描述出水圳實地絕對位置成果，如圖 18。



圖 18 本研究套繪 3-2 號隧道外緣線位置示意圖

農業部農田水利署桃園管理處於民國 111 年委託桃園市政府地政局辦理桃園大圳導水路位置地籍預為分割作業成果，桃園市政府地政局利用實地全測站測量之成果，直接套繪於中興測量之光達數據，圖 19 則為隧道 3-2 套繪位置圖。

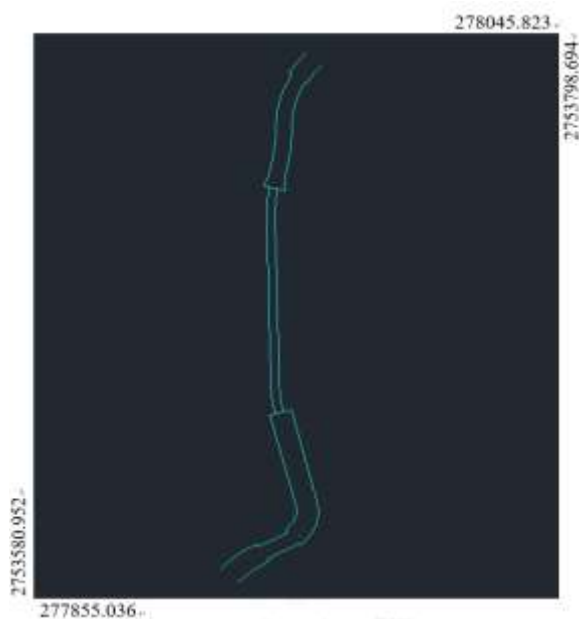


圖 19 桃園市政府地政局與中興測量套繪隧道 3-2 之位置圖示

圖 18 為本研究套繪 3-2 號隧道外緣線位置示意圖，圖 19 為桃園市政府地政局與中興測量套繪隧道 3-2 之位置圖示，本研究將兩者成果按同比例相互套繪成圖 20。

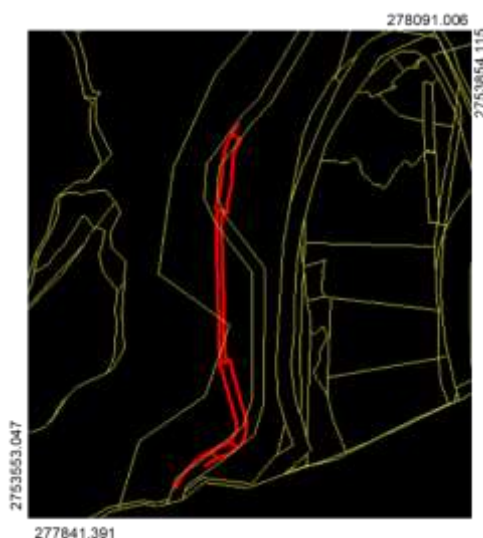


圖 20 3-2 號隧道地籍位置示意圖

圖 20 成果顯示結合地籍圖重測成果（圖 17）及水路測量絕對位置（圖 18），可套繪成隧道地籍位置圖。本研究套合後成果可明顯看出隧道構造物與原地籍位置不相符之情形，推判 3-2 號隧道曾經過改道修築，惟管理單位過去無法取得完整且正確之地理資訊，亦無法做出有效的財產管理作為。故若導水路全線皆能以單站式光達掃描繪製成果，並作坐標轉換即能求得導水路之絕對坐標位置，以利管理。

2. 效益評估

本研究方法與傳統地籍測量方式效益評估比較如表 11，本研究測繪成果效益較傳統地籍測量方式為佳。

表 11 多元空間資料技術測繪成果效益比較表

	3D LiDAR	傳統地籍測量
測繪成果精度	公厘級	公分級
測量範圍	大	小
測繪成果	三維立體	二維平面
人力	單人作業	三人作業
單站外業時間	5-10 分鐘	20 分鐘
內業作業方式	軟體拼接	人工彙整
研究區作業時間	3 小時 (導水路全線含隧道)	2 小時 (僅能測繪明渠段)

五、結論與建議

(一) 結論

1. 本研究順利完成桃園大圳導水路歷史與地理的資料收集。(蒐整資料請參見本文之第二章)
 - (1) 日治時代(大正 10 年, 1922)對桃園大圳首次繪製之導水路地籍圖, 圖上相關資訊均與現狀有極大落差。
 - (2) 民國 105 年桃園市政府地政局方依此導水路圖籍, 經地籍重測程序建置完成數值地籍圖資。
 - (3) 2022 年中興測量公司建立桃園大圳首套導水路影像資料, 兩套圖資位置精度皆欠缺與現行地籍控制測量坐標系統作平差校正。
 - (4) 2024 年本研究嘗試以多元空間資訊技術, 建立統一的參考標準, 對桃園大圳完成嚴密控制測量與影像資料圖資整合之研究。
2. 本研究兩次已知控制點檢核結果較差平均值分別為 $dN: -0.034(m)$ 、 $dE: 0.001(m)$, 及 $dN: -0.004(m)$ 、 $dE: 0.009(m)$ 。新設控制測量成果經兩次衛星觀測成果互為檢核, 其各方向較差 RMS 值為: $\Delta N: 0.009(m)$ 、 $\Delta E: 0.016(m)$ 、 $\Delta h: 0.020(m)$, 符合作業手冊(採用電子化全球衛星即時動態定位系統辦理控制測量作業手冊)之規定。
3. 第一次掃描作業成果, 測站數共 14 站, 總點雲數為 261,473,697, 拼接精度為 $0.0057(m)$ 。第二次掃描作業成果, 測站數共 14 站, 總點雲數為 263,709,441, 拼接精度為 $0.0036(m)$ 。因第二次掃描鑒於第一次掃描的拼接經驗, 擺放共軛球的位置與測站位置間之相對距離較為固定, 且皆保持於 10 公尺內, 故精度有所提升。

4. 經比對第一次掃描成果與原有中興測量測繪之成果，南端參考點坐標較差之 ΔN 平均值為 0.154(m)、 ΔE 平均值為 0.010(m)，北端參考點坐標較差之 ΔN 平均值為 0.118(m)、 ΔE 平均值為 0.037(m)。第二次掃描成果較差南端參考點坐標較差之 ΔN 平均值為 0.171(m)、 ΔE 平均值為 -0.028(m)，北端參考點坐標較差之 ΔN 平均值為 0.104(m)、 ΔE 平均值為 0.014(m)。比對結果略有落差。
5. 比對四處本研究與桃園市政府地政局測繪之固定物位置坐標，各處較差平均分別為 A 處：0.011(m)、B 處：0.017(m)、C 處：0.027(m)及 D 處：0.030(m)，點雲轉換後坐標成果與實測點位置較差皆小於 2 至 6 公分，完全符合地籍測量實施規範之精度要求，顯見本實驗之點雲成果成功轉換至絕對坐標系統。
6. 本研究成果成功顯示，結合日治時期地籍圖成果（圖 17）及本研究水路測量之絕對位置（圖 18），可套繪成隧道地籍位置圖（圖 20）。套合後成果可明顯看出導水路因改道而與原地籍位置不相符之情形，推測圖 17（日治時期）其水路位置是以相鄰地上物位置套製而成，圖籍位置精度就存在有極大疑慮，故和本研究成果展示有若干誤差。
7. 經本研究驗證，地面光達單次掃描大圳隧道時間約 3 小時，點雲拼接作業需時約 4 小時，總點數約 2 億 6 千萬點，與傳統全測站地籍測量方式相較，更能完整呈現隧道內外真實狀況及待測點位之空間位置。

（二）建議

1. 導水路測量可能涵蓋明渠及暗道，部分圖根點因受限於地形透空性不佳，無法順利以 e-GNSS 觀測方式取得坐標數據，需另以傳統全測站經緯儀導線測量方式輔助取得所需點位之相關坐標數據，驗證導水路測量必須結合多元化空間量測技術始能順利達成任務。
2. 通水隧道地形地物特徵性質過低，且隧道內常年積水，不易設置定著規標，故如欲進行 3D-LiDAR 掃描，就必須採用較易辨識之共軛球法為拼接方式，但點雲拼接之精度誤差較大。
3. 由本研究之實驗經驗得知，隧道內地面狀況良多，為取得水圳完整掃描成果及絕對位置，建議以單站式地面光達為較佳的測量方式，並依照與套繪圖資同之控制坐標系統為坐標轉換依據，以利圖資成果整合。
4. 本研究所採用之方法，作業時間雖較傳統地籍測量方法為多，仍可在一個工作天內完成，但其可測繪範圍及完整性，遠較傳統地籍測量方式更具效率，其成果能正確描述待測物之空間位置並做加值運用。
5. 經本研究測繪出經改道修築之 3-2 號隧道實地套合地籍圖位置（如圖 20）與日治時期地籍圖資所載應為明渠結構之導水路位置（如圖 2）不符，惟重測當時調查程序完備與測量結果相符，無涉重測成果之更正，但為日後桃園大圳導水路之管理養護工作能順行，建議管理單位可參考本研究結果盡速取得用地產權。
6. 本研究為首位結合桃園大圳空間資料與地籍圖資之整合建置，其成果確實能顯著提升觀測精度和效率，為未來相關研究和實務操作提供了重要參考，更確立桃園

大圳現代化工程之應用與發展。

參考文獻

- 內政部國土測繪中心，2021，《採用電子化全球衛星即時動態定位系統辦理控制測量作業手冊》，台灣，頁 1-90。
- 內政部，2023，《地籍測量實施規則》，內政部國土測繪中心，臺中，頁 1-48。
- 內政部地政司地政法規全球資訊網，法規查詢系統，
<https://www.land.moi.gov.tw/law/chhtml/>，最近檢索時間 2025 年，4 月。
- 行政院農業委員會農田水利署桃園管理處，2022，《111 年度桃園大圳導水路資料建置計畫》，中興測量有限公司，台灣，頁 1-198。
- 高書屏，2022，《衛星定位測量概論》，三版，詹氏書局，臺北，第 1-296 頁。
- 張齡方，2022，《活水泉源：桃園大圳開鑿歷史》，行政院農業委員會農田水利署桃園管理處，桃園市，頁 1-92。
- 陳泓錡，2012，《猴山岳步道崩塌地的地形地貌紀錄與分析》，國立台北科技大學土木與防災研究所(碩士論文)，臺北，頁 12-25。
- 黃立信、張嘉倫、邱建華、王建文，2019，地面光達點雲資料處理最佳化之研究，《測量工程 Journal of Society Engineering》，第 58 卷，頁 52-64。
- 黎明工程顧問股份有限公司，1996，《桃園大圳導水路及幹線現況調查及基本資料建檔第一期成果報告》，桃園，頁 1-47
- 蔡欣達，2022，空間資訊測繪技術之最新發展及應用案例介紹，《技師期刊》，第 96 期
- 鍾岳龍、陳鶴欽，2023，e-GNSS 即時動態定位衛星定位儀校正系統實務作業探討，《國土測繪與空間資訊》，第十二卷，第一期，頁 43-66。
- Leica 儀器：<https://www.highrise.com.tw/>最近檢索時間 2025 年，4 月。
- RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GmbH, 2015 , 3D TERRESTRIAL LASER SCANNER General Description and Data Interfaces, Austria.

以支援向量迴歸在水稻田產量高解析度光譜影像研究

萬絢¹ 李哲源² 鄭育欣^{3*}

論文收件日期：114.04.17

論文修改日期：114.05.21

論文接受日期：114.06.06

摘 要

有鑑於水稻在人類生活中扮演著重要的角色，估計其產量仍是一項極具挑戰性的任務。傳統上，差異影像分類結合堤防是識別水田位置與分佈的主要方法。此方法可計算植被指標的變化。然而，使用迴歸方程式估計水稻產量的相對誤差往往相當大。本研究提出一種創新的方法，利用區域物件導向分類 (ROC) 技術與支援向量迴歸 (SVR) 產生一系列模擬的生產密度。與使用原始資料分析的平行研究相比，本研究分析了影響水稻核心影像波段因素的頻譜範圍。因此，可以產生生產誤差之減少。此方法有助於提高農業價值與效率。SVR 的計算準確度約為 4.2%，而 RSES(粗集合開發平台系統)選取核心因子後約為 3.4%。

關鍵字：支援向量回歸、粗糙集探索系統、區域物件導向分類、影像分類

¹ 教授，嶺東科技大學資訊科技系。

² 碩士生，逢甲大學都市計畫與空間資訊技系。

³ 副教授，嶺東科技大學資訊科技系。

* 通訊作者，TEL：(04)23892088 轉 3722，E-mail：hsin@teamail.ltu.edu.tw

A Support Vector Regression Approach on the Estimation of Paddy Rice of Image Classification

Shiuan Wan ¹, Che-yuan Li ², Yu-Hsin Cheng ^{3*}

Abstract

In view of paddy rice plays an important role in human life, estimating its production remains a challenging task. Traditionally, difference image classification combined with levees has been a major approach for identifying the location and distribution of paddy fields. This method accounts for variations in vegetation indicators. However, the relative error in estimating paddy rice production using regression equations tends to be quite large. This study proposes an innovative method using the Regional Object-Oriented Classification (ROC) technique and Support Vector Regression (SVR) to generate a series of simulations for production density. The spectral range of core factors affecting paddy rice is analyzed, compared to the parallel study of using raw data analysis. Consequently, the prediction of production errors can be reduced. This method contributes to improving agricultural value and efficiency. The computational accuracy of SVR is approximately 4.2%, while the RSES(Rough Set Exploration System) core factor achieves about 3.4%.

Keywords: Image Classification, Regional Object-Oriented Classification, Rough Set Exploration System, Support Vector Regression

¹ Professor, Department of Information Technology, Ling Tung University

² Graduate Student, Department of Urban Planning, Feng Jia University.

^{3*} Associate Professor, Department of Information Technology, Ling Tung University.

* Corresponding Author ,TEL:+886-4-23892088#3722, E-mail: hsin@teamail.ltu.edu.tw

1. Introduction

Agricultural Spatial Decision Support Systems (ASDSS) (Sugumaran,2013) are computer-based systems that integrate the geographic storage, search, and retrieval capabilities of Geographic Information Systems (GIS) with decision models and optimization algorithms to support agricultural production estimations. This study proposes an optimized Region Object-Oriented Classification (ROC) process to analyze paddy rice production using image data (Wan *et al.*,2010). Surface information from the study area, Y-Pu, was collected to compute the paddy rice production by taking UAV (Unmanned Aerial Vehicle) image data. Additionally, hyperspectral data, along with various texture information and vegetation indices, were gathered to analyze the study area. UAVs can operate with varying degrees of autonomy, either under remote control by a human operator or autonomously via a computer program. In this study, images of the study area were captured as part of the data collection process and used as materials for analysis.

In addition, texture information refers to the spatial arrangement and variation of pixel intensities or patterns in an image. It provides important visual cues about the surface structure and composition of objects, such as smoothness, roughness, or regularity (Shahi *et al.*,2022). In image classification, texture plays a key role—especially in tasks where color or shape alone is not sufficient to distinguish between different classes (Carr,1996). Texture features capture repetitive patterns, frequency components, or statistical properties in an image. Generally speaking, texture features capture repetitive patterns, frequency components, or statistical properties in an image. It contains : (a)First-order statistics: Based on individual pixel values (e.g., mean, variance, entropy).(b)Second-order statistics: Analyze pixel pairs, like in the Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM), which measures how often pairs of pixel values occur at a given spatial offset and orientation (Chica and Abarca,2000).

Previous studies in Taiwan have employed regression-based models to estimate land area using image data. However, past research on agricultural monitoring has primarily relied on pixel-based classification methods. A major drawback of these decision support systems (DSS) is the presence of "salt-and-pepper" noise, which confuse the decision-makers. To address this issue, this study aims to develop a region-based classification model optimized for size and similarity variables. This new approach is designed to handle variations in paddy rice field sizes to achieve more accurate estimations (Regression,2000). In the past, the accuracy for in-situ investigation of production on paddy rice correlated to real image data was very poor. Hence, this study will propose an innovative method that combines ROC with an image classifier to analyze the context of each paddy rice pattern area. In high-spatial-resolution images, a group of pixels can better represent the characteristics of land cover compared to individual pixels. Therefore, we organize

adjacent pixels into objects and treat each object as the minimum classification unit. Human image interpretation typically relies on multiple visual features, such as relative size, shape, texture, pattern, and spatial distribution, which aggregate to form distinguishable objects. To replicate this process, image segmentation is required to analyze the spatial clustering of pixels, ensuring that homogeneous areas are identified at an appropriate scale. Leveraging these advantages, object-based image analysis has been widely applied over the past decade to improve classification accuracy, especially when dealing with images of low spectral dimensionality.

2. Study area and Data

2.1 Study Area

The study area is located at Y-Pu, Taichung County (24°18'N, 120°38'E Please Refer to Figure 1). The total area is about 200 ha. There are 95% of the ground surface is paddy rice and 5% of other crops. The resolution is 10cm x 10cm. The north area is a river platform and the south is an embankment that surrounds the study area. The study mainly collected two series of survey data of 2013 and 2014 respectively. The production of paddy rice is collected from scenario 1 of 2013 by 19 places of paddy rice zone. Figure 1(a) also collected the data from them. Figure 1(b) presents the distribution point. A moving widow with 3x3 (9 pixels) or 8 to 7 pixels is selected as a different sample to describe the edges or borders. The sensor for high resolution hyperspectral is Leica in this study.

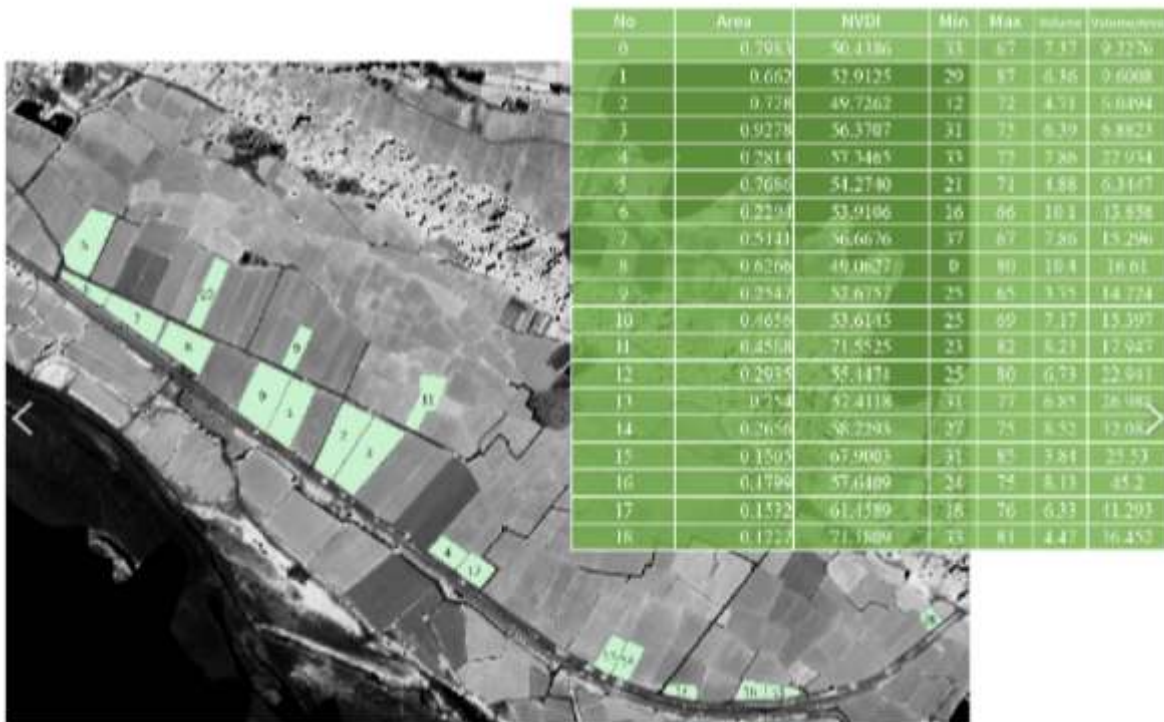


Figure 1 (a) Study Area



Figure 1(b) The distribution of 3X3 samples

Figure 1 The study area and sample distribution

2.2 Study plans

The Study flowchart is presents on Figure 2

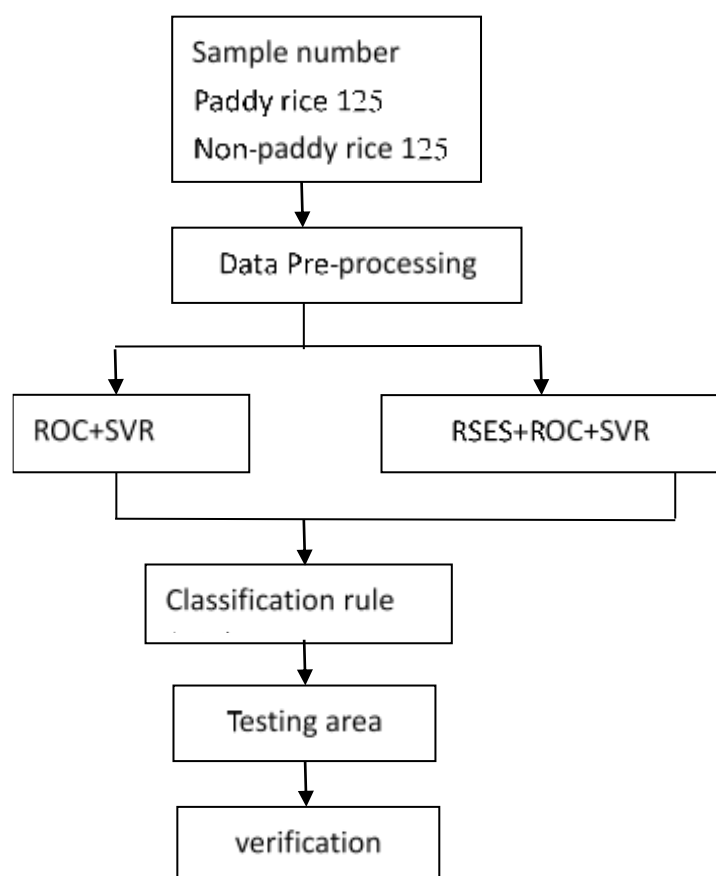


Figure 2 Study Steps for Analysis

2.2.1 Step 1 Input NDVI as vegetation indicator

To determine the density of vegetation on a patch of land, researchers must observe the distinct colors (wavelengths) of visible and near-infrared sunlight reflected by the plants. As can be seen through a prism, many different wavelengths make up the spectrum of sunlight. Nearly all the vegetation indices employ this difference formula to quantify the density of plant growth on the earth—near-infrared radiation (NIR) minus red radiation (R) divided by the near-infrared radiation plus red radiation. The result of this formula is called the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The values for NDVI are obtained from ADS-40 image. The range of this value is $[-1, 1]$.

2.2.2 Step 2 Input Grey level co-occurrence matrix (GLCM) as texture feature

Texture features have long been used in remote sensing applications for representing and retrieving regions similar to a query region (Chica and Abarca, 2000). Texture is a real structure in image that defines local spatial organization of variations on spectral values that is repeated in a region of larger spatial scale spatially. Thus, the perception of texture is a function of spatial and radiometric scales. Various representations of texture have been proposed through statistical, geometrical, model-based methods and signal processing methods that include Fourier transforms, convolution filters, co-occurrence matrix, spatial autocorrelation, fractals, variogram, etc. The GLCM and associated texture feature calculations are the basic image analysis process in this study. It is a statistical method for the spatial relationship of pixels, also known as the Grey-level spatial dependence matrix. Given an image composed of pixels each with an intensity (a specific Grey level), the GLCM is a tabulation of how often different combinations of Grey levels co-occur in an image or image section. The texture feature uses the contents of the GLCM to give a measure of the variation in intensity (a.k.a. image texture) at the pixel of interest. In general, there are also three stages: (1) creating a Grey level co-occurrence matrix, (2) specifying the offsets, and (3) deriving statistics index from a GLCM. The basic statistics from the GLCM method are contrast index (measures the local variations in the Grey-level co-occurrence matrix), correlation index (measures the joint probability occurrence of the specified pixel pairs), energy index (provides the sum of squared elements in the GLCM), and homogeneity index (measures the closeness of the distribution of elements in the GLCM to the GLCM diagonal). However, NDVI, R-Entropy, B-Entropy, G-Entropy, and IR-Entropy are used for indicator and texture on image classification. The window size of the texture method is 3×3 , and the preventive data of format is a floating single type for easy extraction of knowledge information. Hence, the image of this study contains B, G, R, IR with NDVI, R-Entropy, B-Entropy, G-Entropy, and IR-Entropy bands to estimate the production of paddy rice.

2.2.3 Step 3 The process of multi-bands to single band

In this study, the appropriate synthesized image for the regional growth (RG) method is based on the Grey-level image transformation and the map transformation concept. In this process, some of the same Grey level values of the given bands in the multispectral image are multiplied by the probability value of the same Grey level for the whole image. Then, the calculation function is applied to the accumulation of digital values with regard to the different bands at the same location for the whole image. Through this process, the multi-information of the bands is transformed into a one-dimensional image data to keep the majority of information for each category of every band. The probability values of each Grey level are counted by the number of outcomes of a given image and then they are divided into the total number of pixels in the image for each band. After all the bands on the image are transformed, it is used to count the total value of the synthetic image at the same location of every band. Finally, the multi-bands are successfully transformed into one-dimensional information by using this process. However, in this study, 55 of the hyperspectral image with NIR, NDVI, R-homogeneity, G-homogeneity, and NIR-homogeneity bands are used and they are transformed into one-dimensional Grey level images (Qian *et al.*,2012). Those are all derived from Lica a high-resolution airborne digital sensor.

2.2.4 Step 4 used image segmentation to ROC (Regional Object based classification)

Using image segmentation for ROC (Region/Object-based Classification) is a powerful approach that improves classification by analyzing meaningful regions instead of individual pixels (Wan *et al.*,2014). The accuracy of the classification heavily depends on the quality of the initial segmentation. Over-segmentation (too many small regions) or under-segmentation (large regions containing multiple classes) can negatively impact results. By considering groups of pixels, this method incorporates spatial context, which can be helpful in distinguishing objects with similar spectral properties but different spatial arrangements. It is especially useful in high-resolution imagery, where pixel-based methods can be noisy or mislead classification due to spectral variability within objects (Blaschke,2010). As usual, different segmentation techniques can be used depending on the application (Hay and Castilla,2000):

- (a) Multi-resolution Segmentation: Groups spectrally similar adjacent pixels while considering spatial and textural features.
- (b) Thresholding & Region Growing: Simple methods that segment based on pixel intensity values.
- (c) Machine Learning-Based Segmentation: Uses deep learning models to segment objects in complex images.

2.2.5 Step 5 used Rough Set Exploration System(RSES) to construct the model

The Rough Set Exploration System (RSES) is a software toolkit designed for analyzing tabular data using methods derived from Rough Set Theory (Pawlak,1982). It features a user-friendly graphical interface and a computational kernel, making it accessible for data exploration, classification support, and knowledge discovery. RSES is freely available for non-commercial use and has been developed by research teams at institutions like the University of Warsaw and the University of Rzeszów in Poland (Chang and Wan,2015). The attributes of R, G, B, NIR, NDVI, R-homogeneity, G-homogeneity, and NIR-homogeneity bands will plug into the RSES to retrieve the core factor which governs the production of paddy-rice.

3. Research Method

Estimating paddy rice production using Region/Object-based classification (ROC) and Support Vector Regression (SVR) involves combining spatial data analysis with machine learning regression techniques. Below is a step-by-step methodology:

3.1 Region/Object-based classification (ROC)

Regional-based Classification (ROC) could refer to methods that focus on analyzing specific regions within an image to improve classification accuracy. This approach is often used in tasks like object detection or segmentation, where identifying and classifying distinct regions of an image is crucial. There are two parts of the procedure:

- 3.1.1 Object Detection: Identifying and classifying objects within specific regions of an image (e.g., detecting cars, pedestrians, or traffic signs in a photo).
- 3.1.2 Image Segmentation: Dividing an image into meaningful regions and classifying each region (e.g., separating a medical scan into areas of healthy tissue and abnormalities).

3.2 RSES(Rough Set Exploration System) extract core factors

Rough Set Theory (RST) is a mathematical approach to dealing with vagueness and uncertainty in data analysis. It was introduced by Zdzisław Pawlak in the early 1980s as a tool to handle incomplete or imprecise information. Unlike traditional set theory, which requires precise definitions for set membership, rough set theory allows for the approximation of sets when exact information is not available.

The central concept of RST is the approximation of a set using two crisp (precise) sets called the lower approximation and the upper approximation. These approximations are derived from the data itself without requiring any external parameters or prior assumptions about the data, such as probability distributions.

3.3 Support Vector Regression(SVR)

Support Vector Machine is applied to classification problems as well as the case of regression. It contains the major influenced factor that characterize maximum margin algorithm: a non-linear function is leaned by linear learning machine mapping into high

dimensional kernel induced feature space. The capacity of the system is controlled by parameters that do not depend on the dimensionality of feature space. The testing data also can predict by applying the training data to the testing data.

The support vector regression has two parameters for observing the error range (Smola,2004). In the Bayesian framework, predictions for a regression problem are expressed in terms of a distribution of output values. The mode of this distribution corresponds to the most probable output, while the uncertainty associated with the predictions can conveniently be expressed in terms of error bars. The evaluation of error bars has been considered in the context of the class of generalized linear regression models and provided insights into the dependence of the error bars on the location of the data points. It derived an upper bound on the true error bars in terms of the contributions from individual data points which are themselves easily evaluated.

4. Results

Support vector regression has been introduced to solve regression and prediction problems. It has become a hot topic of intensive study due to its successful application in classification tasks and regression tasks, especially on time series prediction and financial-related applications. The support vector regression (SVR) is for regression and function approximation. The combination of clustering and a state-of-the-art technique has been proposed for knowledge gain and accuracy improvement in a complex prediction problem. Figure 4 shows two different initial random conditions for learning epochs (x-axis) vs estimation errors(y-axis).

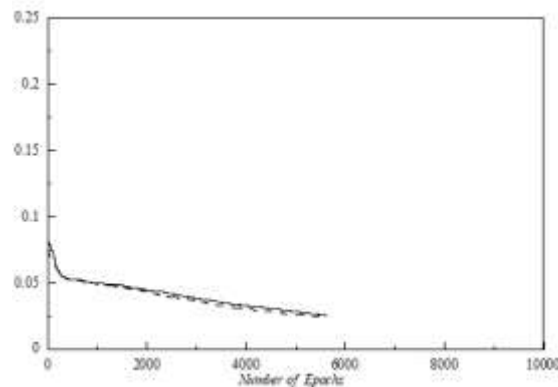


Figure 4 the example of $c=9.3$ $g=27.8$ convergence diagram for SVR

Figure 5 presents the production of the actual and predicted of SVR. The x-axis and y-axis shows the predicted production of the ratio the min to max of Figure 1 (the green Table).

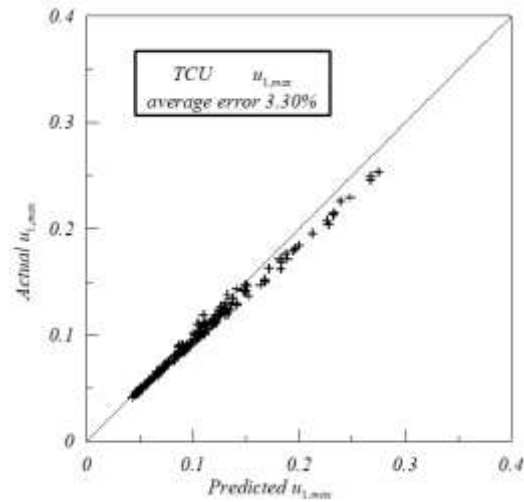


Figure 5 average error among prediction and real production of rice

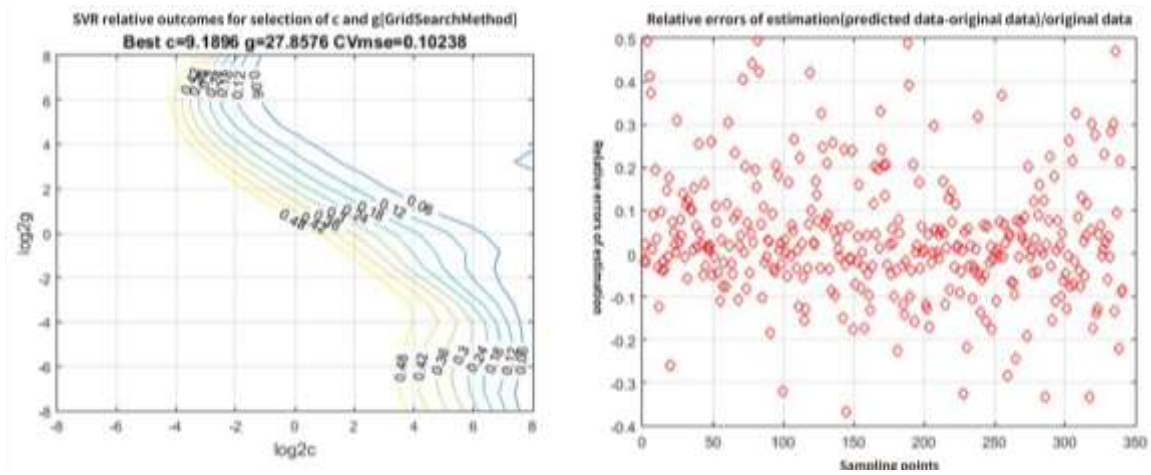


Figure 6 (a) Estimator of parameter selection for single sample (b) relative difference of sample points.

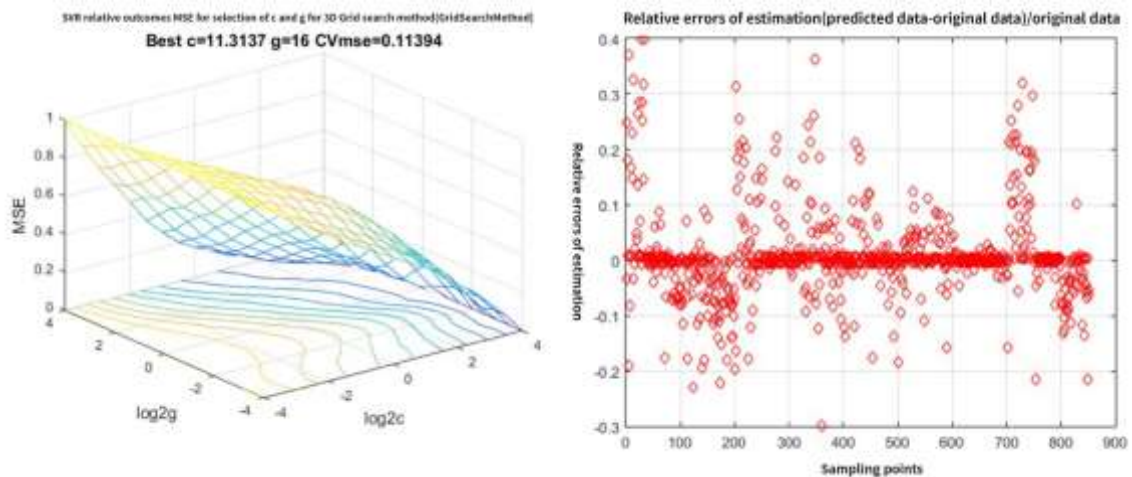


Figure 6 (b) SVR parameter selection of 3X3 sample

Figure 6 (a) shows the c value and g value with the difference of estimating the CV_{mse} . The CV value is the difference between predictor and true value of each 3X3 pixels production of paddy rice (see Figure 1 green Table). It is found that while $c=9.19$ and

$g=27.86$ obtained the lowest $CV_{mse}=0.1024$. Figure 6(b) shows the relative difference of predictor and true value of the paddy rice productions. The Figure 6(b) is the optimal c and g by using grid search approach. It is found that 84% of the samples point falls into the range of 10%.

4.1 Case A without feature extraction

From Figure 1, the $X_1, X_2 \dots X_n$ represents the input bands of neural network. The first stage is using the original data with 59 bands to the system. We take 3×3 (about $9m^2$). The average of prediction error is about -5.51 of 129.21 for the overall area. The error rate is 4.2%.

4.2 Case B using RSES as feature extraction

The second stage is considered to use RSES as feature extraction. We input the original data (59 bands) into RSES and the decision is paddy rice vs non-paddy-rice. The extraction image-bands are NDVI, R-Entropy, Band B and IR. The average of prediction error is about 1.72 of 129.21 for the overall area. The error rate is about 1.3%.

Summary and Conclusion

The study applied hyperspectral image data to predict rice production in a given field. Specifically, the selected areas include multiple surveyed production sites managed by various farmers, with data collected using hyperspectral imaging. In contrast, the unknown paddy rice fields only have cultivation information derived from images provided by different farmers.

The first stage involves applying a region-based object-oriented classification (ROC) technique to identify the boundaries of each paddy field. Each pixel within the defined margins is then counted. In the second stage, the collected data is used in a Support Vector Regression (SVR) approach. To enhance the accuracy of the model, a 3×3 moving window is applied. Finally, the SVR estimations are compared with actual paddy rice cultivation data. The error rate of SVR is approximately 4.2% with using feature extraction from RSES and 1.2% without it, respectively. The error rate of SVR is around 3.4% and 1.9% when using the optimal values for parameters C and γ (gamma).

Reference

- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), pp.2–16.
- Carr, J.R. 1996: Spectral and textural classification of single and multiple band digital images. *Computers & Geosciences* 22(8), pp.849–865.
- Chang, S.H., Wan, S., 2015. Discrete rough set analysis of two different soil-behavior-induced landslides in National Shei-Pa Park, Taiwan. *Geoscience Frontiers* 6, pp.807–816. doi:10.1016/j.gsf.2013.12.010

- Chica-Olmo, M., Abarca-Hernández, F.: Computing geostatistical image texture for remotely sensed data classification. *Computers & Geosciences* 26(4), pp.373–383 (2000).
- Hay, G. J., & Castilla, G. (2008). Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA): A new name for a new discipline. In *Object-Based Image Analysis* (pp. 75–89).
- Pawlak Z., Rough sets. *International Journal of Information and Computer Science*, Vol.11 , 1982, pp.341-356.
- Qian, Y., Zhou, L., Huang, Y., 2012. Color human slice segmentation based on texture information, in: *Proceedings - 2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2012*. pp. 2620–2623.
- Regression, V., Introduction, I., 2003. Apply decision tree and support vector regression to predict the gold price. *Neural Networks*, 2003, pp. 2488–2492.
- Shahi, T.B., Xu, C.Y., Neupane, A., and Guo, W. (2022). Machine learning methods for precision agriculture with UAV imagery: a review. *Electronic Research Archive* 30, pp.4277–4317.
- Smola, A. J., & Schölkopf, B. 2004. A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing*, 14(3), pp. 199–222.
- Sugumaran, 2013. Spatial decision support system, *Spatial Decision Support Systems*. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Wan, S., Lei, T.C., Chou, T.Y., 2010. An enhanced supervised spatial decision support system of image classification: consideration on the ancillary information of paddy rice area. *International Journal of Geographical Information Science* 24, pp.623–642.
- Wan, Shiuan, Tsu Chiang Lei, and Tein Yin Chou. “Optimized Object-Based Image Classification: Development of Landslide Knowledge Decision Support System.” *Arabian Journal of Geosciences* 7.5 (2014): pp.2059–2070.

從戰地轉型到觀光：金門土地利用變遷對碳儲存空間 分布之影響

張曜麟¹ 黃幹忠² 吳政庭^{3*}

論文收件日期：114.04.22

論文修改日期：114.06.09

論文接受日期：114.06.20

摘 要

隨著極端氣候事件日益頻繁，全球對溫室氣體排放控制與碳平衡議題的重視持續升高。自《京都議定書》（1997）、《巴黎協定》（2015）至 2021 年第 26 屆聯合國氣候變遷大會（COP26），國際間已明確提出 2050 年達成淨零排放的目標。碳儲存量資訊之掌握與揭露，已成為氣候治理與空間規劃的重要基礎。本研究以離島型區域—金門縣作為實證場域，分析自解除戰地政務（1992 年）及小三通開放（2001 年）以來，由軍事用途轉型為觀光導向所帶動之土地利用變遷，對生態系統碳儲存量與空間分布所造成之影響。研究運用 InVEST（Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs）碳儲存與固碳模型，分析 2006 年、2013 年、2021 共三個時間點之土地利用資料，評估碳儲存量變化趨勢與土地利用型態之關聯性。研究結果可作為未來離島空間規劃與生態碳匯政策之參考，促進生態系統服務功能維護與碳中和目標推進，具實務應用與政策建議價值。

關鍵字：InVEST 模型、碳儲存量、國土功能分區、離島土地利用變遷

¹ 助理教授，嘉南藥理大學公共安全及消防系。

² 副教授，崑山科技大學房地產開發與管理系。

³ 助理教授，國立金門大學都市計畫與景觀學系

* 通訊作者，TEL: (082) 313748，E-mail: ctwu@nqu.edu.tw

From Military Zone to Tourism Hub: The Impact of Land Use Change on Carbon Storage Spatial Patterns in Kinmen Island

Yao-Lin Chang¹, Kan-Chung Huang², Cheng-Ting Wu^{3*}

Abstract

With the increasing frequency of extreme climate events, global attention to greenhouse gas emission control and carbon balance has continued to intensify. Since the adoption of the Kyoto Protocol (1997), the Paris Agreement (2015), and the 26th UN Climate Change Conference (COP26) in 2021, the international community has set a clear target of achieving net-zero emissions by 2050. The acquisition and disclosure of carbon storage data have thus become fundamental to climate governance and spatial planning. This study takes Kinmen County—a representative offshore island in Taiwan—as the case study area to investigate how land use changes driven by the transition from military governance (lifted in 1992) to cross-strait tourism development (initiated in 2001) have affected ecosystem carbon storage and its spatial distribution. Using the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) carbon storage and sequestration model, we analyze land use data from four time points: 2006, 2013, 2021, and a projected scenario based on the National Land Functional Zoning draft. The study evaluates the relationship between land use transformations and carbon storage variations over time. The results provide a valuable reference for future spatial planning and carbon sink policies on offshore islands, contributing to the promotion of ecosystem service sustainability and the advancement of carbon neutrality goals. The findings also offer practical implications for land management and policy-making in the context of climate change.

Keywords: Carbon Storage, InVEST Model, Island Land Use Change, National Land Functional Zoning

¹ Assistant Professor, Department of Public Safety and Fire Science, Chia Nan University of Pharmacy & Science.

² Associate Professor, Department of Real Estate Development and Management, Kun Shan University.

³ Assistant Professor, Department of Urban Planning and Landscape, National Quemoy University,

* Corresponding Author, TEL:+886-82-313748 · E-mail: ctwu@nqu.edu.tw.

一、研究動機與目的

《國土計畫法》係因應全球氣候變遷與資源競爭挑戰所制定之上位空間政策工具，強調自然資源保育與土地合理利用之並重原則。旨在兼顧國土安全與永續發展目標，透過自然與人文資源保育、產業與資源合理配置、國土整合管理機制強化，以及環境敏感地區與破壞地區之復育，導引土地開發朝向有序與永續之方向發展。該法同時兼顧國土保育、糧食安全、城鄉發展與地方治理彈性，作為全國國土資源空間利用規劃之法定綱要指導文件。依據該法第 15 條，金門縣雖因已全區發布都市計畫與國家公園計畫而無需另擬直轄市縣市國土計畫，惟仍須於 2025 年前完成國土功能分區圖公告，作為後續土地管制與開發管理之依據。

金門地區因其具備多重疊合的地理與制度特殊性，相較於臺灣本島多數地區，其土地使用與發展歷程長期受到戰地政務體制所限制，並未經歷高度都市化與產業密集開發，保留大量未受干擾之自然與農業景觀。此一背景使金門擁有潛在的高碳儲空間與轉型空間彈性，對於檢視土地利用變遷與碳儲關係具有高度代表性。與臺灣本島相比，金門在解除戰地政務（1992 年）後快速進入觀光導向的空間再造，並於 1995 年成立金門國家公園，成為全臺唯一涵蓋文化資產、自然生態與戰地遺構之綜合型國家公園。此制度設計亦深刻影響金門的土地使用方式與生態管制架構，進一步促成區域碳儲潛能的重新分布。若與其他具前線任務背景之地區如馬祖、東引等相比，金門因其地理規模較大、戰地轉型時間較早，且具備較完整的土地調查與開發控制體系，因此具備長時序空間資料與碳儲推估的可行性。相對而言，其他地區尚處於轉型初期或受限於地形、行政資源不足，較難進行系統性時空分析。

是故，金門地區不僅能作為臺灣離島軍事轉型案例中的先行個案，亦為探討「戰地轉型-觀光開發-生態保育」多重目標下土地利用政策效果與碳儲潛能評估之理想範例，具備高度學術探討價值與政策應用潛能。此外，金門縣自 1992 年解除戰地政務、2001 年開啟兩岸小三通後，土地利用結構由封閉軍事管制區域轉向開放型觀光導向使用，大量軍事空間逐步轉型為觀光、聚落與交通使用，進而導致土地利用型態與生態功能之變遷。尤其森林與農業用地之消長與裸露地增加，對於島嶼碳儲存潛能產生實質衝擊，亦反映國土轉型過程中生態服務潛勢之變動。土地利用變遷對生態系統服務具有深遠影響，除其本身具備空間分布特性外，亦因物質與能量在生態系統內之空間流動而影響其功能與服務範圍（Millennium Ecosystem Assessment, 2005）。若能將生態系統服務的空間資訊納入國土規劃，並量化不同土地利用型態對其服務功能之影響，將有助於建構更具永續性的國土空間資源配置策略。

基於上述背景，本研究以金門地區為對象，針對其近年積極發展離島生態觀光期間所產生之土地利用變遷，探討不同發展行為對碳儲存與棲地品質等生態系統服務的影響。研究將應用由美國史丹佛大學、世界自然基金會（WWF）與大自然保護協會（TNC）共同開發之「生態系統服務與權衡綜合評價模型」（InVEST, Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs），分析多時期土地利用資料與碳儲存服務之變化關聯。藉此評估金門由軍事導向轉為觀光導向過程中之土地利用變遷對

生態系統服務功能的實質影響，並作為未來離島國土空間規劃與土地管理策略之重要依據。

二、文獻回顧

在全球氣候變遷與土地利用高度競爭的背景下，生態系統所提供的各類服務日益受到重視。無論是供應資源、調節氣候，抑或支撐文化與社會功能，這些來自自然的系統性支持皆與人類福祉息息相關。學術界在生態系統服務（Ecosystem Services）理論的推展下，逐步建構出可用以評估自然資本貢獻的分類架構與衡量方式，尤其自《千年生態系統評估報告》提出後，更強化其作為永續發展、國土治理與空間規劃決策依據的理論地位。

然而，面對實際土地使用變遷對生態系統服務造成的多重影響，單靠概念理解與靜態指標已不足以回應政策實務的需求。因此，如何導入具空間解析能力與量化模擬功能的工具，成為生態系統服務評估邁向操作化的關鍵。InVEST 模型作為全球廣泛應用的生態服務評估平台，不僅具備模組化與多尺度分析能力，更能有效模擬政策情境下的空間服務變化（Vallet, 2021），成為國土規劃與資源管理中不可或缺之工具。

本章節將分別從生態系統服務之理論基礎與分類架構談起，進而說明 InVEST 模型的發展邏輯與應用潛力，以鋪陳本研究採用該模型進行金門地區碳儲存空間分布分析之理論與技術基礎。

（一）生態系統服務

人類活動對全球生態系統的生物多樣性造成嚴重衝擊，導致地球環境的恢復力與生物承载力逐漸下降。學者 Ehrlich 於 1981 年整合「環境服務」（SCEP, 1970）與「自然服務」（Westman, 1977）兩概念，提出「生態系統服務」（Ecosystem Services）一詞。此後，眾多研究者進一步發展該概念，普遍認為生態系統服務為實現環境保育與永續發展的重要理論基礎（Daily, 1997；Costanza et al., 1997；Haines-Young & Potschin, 2010；Bargiel et al., 2010；Biggs et al., 2012；Englund et al., 2020；Millennium Ecosystem Assessment, 2005）。

Daily (1997) 強調，自然系統提供的生態服務對人類社會具有不可取代的支撐作用，包括碳儲存、水源調節與棲地保育等功能，尤其在面對土地利用變遷與都市擴張的情境下，需更加重視其系統性影響。Costanza 等人（1997）進一步以貨幣化方式估算全球生態系統服務價值，指出森林、濕地等土地類型對碳儲存與氣候調節的貢獻最為顯著，土地覆蓋改變將直接影響生態系統整體價值。

2005 年，聯合國發表《千年生態系統評估報告》（Millennium Ecosystem Assessment, 簡稱 MA），系統性提出十種生態系統類型，包括海洋、海濱、內陸水域、森林、旱地、島嶼、山地、極地、農地與城鎮。該報告將生態系統服務定義為「人類從自然系統中獲得的利益」，此類利益可能為生態系統結構、過程或功能所

提供，且可為人類所直接或間接使用（Millennium Ecosystem Assessment Synthesis Report, 2005）。根據 MA，生態系統服務可分為四大類別，說明如下：

1.供應服務（Provisioning Services）

指生態系統提供給人類之有形產品，如食物、纖維、燃料、生質材料、水資源及遺傳資源等。

2.文化服務（Cultural Services）

指人類從生態系統中獲得的非物質性益處，如精神滿足、知識發展、美學體驗、教育價值、文化遺產、休閒娛樂及社會關係等。

3.調節服務（Regulating Services）

指生態系統對自然過程的調控功能，包含空氣品質調節、氣候調節、水資源調控、土壤保持、水質淨化與病害控制等。

4.支持服務（Supporting Services）

為其他生態系統服務之基礎過程，雖不直接為人類帶來利益，但為維持其他服務功能所必須，如土壤生成、養分循環、初級生產、光合作用及水循環等。

此外，Haines-Young 與 Potschin（2010）指出，景觀破碎與土地利用不當將導致碳儲存潛力下降，並強調生態系統服務與生物多樣性、人類福祉間的連結，尤其在面對氣候變遷與城市化時更需關注。Wu 等人（2023）亦提出應將生態服務的『供給-流動-需求-實現』納入綜合評估框架，補足傳統僅關注生態服務供給面的不足，特別是在政策轉型與土地利用快速變遷區，如金門等區域，更應衡量其實際碳儲存與服務再分配效益。

綜上所述，生態系統服務並非單一獨立概念，而是牽動人類福祉與永續發展的重要基礎。故在空間規劃與土地利用管理中納入生態系統服務的評估與分析，已成為當代永續國土治理不可忽視的關鍵面向。

（二）生態系統服務與權衡綜合評價模型（InVEST 模型）

生態系統服務與權衡綜合評價模型（InVEST, Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs）係由史丹佛大學（Stanford University）、世界自然基金會（WWF）與大自然保護協會（TNC）共同開發，旨在協助評估土地利用與資源規劃情境下，自然資本所提供之多項生態系統服務。其主要功能在於將生物物理與經濟價值轉換進行結合，模擬如碳儲存、棲地品質、水源涵養、土壤保持等服務之空間分布與變化，並可應用於氣候變遷調適與永續國土治理策略（Sharp et al., 2020; Tallis et al., 2013）。

InVEST 模型具備分析多種服務目標與空間資源配置情境的能力，適用於不同尺度與多目標的國土規劃與資源管理需求（Tallis et al., 2013）。其評估結果可協助識別高潛力投資區位，提升人類福祉與自然生態系統雙重效益，亦有助於制定土地利用與保育策略，達成生態保育與經濟發展間的平衡（Wang et al., 2023）。

再者，InVEST 模型整合生態系統服務之生物物理屬性與經濟價值轉換機制，並涵蓋三大主要生態系統類型：淡水系統、海洋系統與陸地系統。透過模組化設計，

研究者得以依據需求選擇不同服務項目（如碳儲存、棲地品質、水資源產量等）進行情境模擬與空間分析，並以地理資訊系統（GIS）圖像形式呈現結果（Tallis et al., 2008；Bagstad et al., 2013；Vallet, 2021）。

近期實證研究亦將 InVEST 模型與土地利用預測工具（如 PLUS 模型）結合，進行情境模擬與政策推演。以中國雲南省為例，Wang et al.（2023）透過 SSP-RCP 情境與 InVEST 模型整合，模擬未來不同發展策略對碳儲存、水資源與棲地品質等服務的影響，證實其對於平衡經濟成長與生態保育具有實用價值。此外，Vallet et al.（2016）則透過 InVEST 模型分析哥斯大黎加林地轉型期間的生態系統服務變動，指出林地復育將有效提升碳儲存與土壤保持功能，對全球氣候政策具啟示意義。

綜合上述，生態系統服務理論提供人類理解自然資本價值與系統性功能的知識基礎，而 InVEST 模型則使該理論得以轉化為具體的空間資訊與量化成果，進而應用於實際國土規劃與土地管理策略之研擬。當氣候變遷與永續議題持續推動政策整合與多目標規劃時，運用科學化模型將生態功能轉化為空間治理依據，將有助於決策者於不同尺度下評估土地利用選擇所帶來之生態影響與社會效益。

本研究即立基於此理論與方法架構，選擇金門地區作為實證場域，蒐集近年土地利用變遷資料，應用 InVEST 模型模擬碳儲存功能之變化趨勢與空間分布情形，希冀為離島地區之永續土地利用與碳平衡政策提供具實證依據與應用價值的參考。

三、研究方法

（一）研究內容

本研究採用空間分析與生態系統服務評估整合架構，藉由地理資訊系統（GIS）處理多期國土利用調查資料，並結合 InVEST 模型中的碳儲存模組（Carbon Storage and Sequestration），進行金門地區之碳儲存潛勢量化與空間分布分析。整體研究內容涵蓋下列三個主要面向：

1. 文獻探討與理論架構建立

蒐集並彙整 2006、2013、2021 年三個時期之國土利用調查成果及碳庫參數設定，及有關生態系統服務概念、評估方法與管理策略之相關文獻，以作為本研究建立理論基礎與研究操作架構之依據。此階段亦涵蓋對生態系統服務與空間資訊應用技術之整合性文獻探討。

2. 土地利用變遷分析

應用 GIS 空間分析工具，針對金門地區於不同國土發展定位階段之土地利用變遷進行分析，特別聚焦於由「戰地政務」階段過渡至發展「離島生態觀光」導向所引發之空間結構變化。此階段旨在彌補金門地區長期以來在土地利用資料整合與分析方面之不足，並為後續模型分析提供關鍵基礎資料。

3. 碳儲存模擬與生態系統服務評估

運用 InVEST 模型進行碳儲存服務模組之模擬，量化土地利用變遷對碳儲存空間分布與容量之影響。藉由模擬不同時期之土地利用資料，評估其對生態系統服務

變化趨勢之影響，進而提供具體科學依據，以作為離島地區土地利用管理與永續國土規劃策略之參考。

(二) InVEST 模型碳儲存模型設定

1. 模型原理

InVEST 模型中的碳儲存模組（Carbon Storage and Sequestration Model）依據不同土地利用／覆蓋類型（Land Use / Land Cover, LULC）估算其碳儲存能力。模型運作原理為：根據每一類土地利用型態，分別計算四種主要碳儲存來源，包括：(1) 地上生物量碳庫（Aboveground Biomass）、(2) 地下生物量碳庫（Belowground Biomass）、(3) 土壤碳庫（Soil Organic Carbon）、(4) 死亡有機物碳庫（Dead Organic Matter）。

各項碳庫依照土地利用類型對應之係數進行量化後加總，得出單位面積之總碳儲存量（Mg C/hectare）。最終輸出結果以空間網格（raster grid）形式顯示每一格網單元的碳儲存量，單位為噸（Megagrams of Carbon, Mg C），可用以進行空間比較與變遷分析。

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}}$$

2. 土地利用類型與碳庫係數設定

本研究參考《國家溫室氣體清冊準則》（IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories）以及 InVEST 3.2.0 模型使用者指導手冊，設定碳儲存模型中六種主要土地利用類型及其對應之碳庫係數值。各土地類型分別對應四項碳庫，包括地上生物量、地下生物量、土壤碳與死亡有機物碳，詳如表 1 所列。

表 1 各土地利用類型之碳庫係數值表

lucode	LULC_name	C_above	C_below	C_soil	C_dead
1	農業用地	63	5	63	0
2	草生地	3	5	63	0
3	森林用地	136	30	63	3
4	建成地	0	0	0	0
5	水體	0	0	0	0
6	裸生地	0	0	0	0

(三) 土地利用分類與資料處理流程

考量金門地區之重要政策啟動時程，包括 2006 年為金門觀光政策大幅啟動、閒置軍事用地初始釋出階段、2013 年為觀光快速成長與國土空間調整高峰期、2021 年則已進入生態保育與韌性啟動並重治理階段；再者，本資料時序亦與金門國家公園管理計畫期程、地方建設計畫（如聚落保存再生、閒置空間再利用）之施政階段相符，可作為土地利用與碳儲變化與政策介入影響關係之對應依據。故本研究乃以此三期資料作為土地利用變遷與碳儲模型模擬基礎，期能藉由金門從軍事轉型至觀

光與永續治理之不同階段土地利用變化特徵，充份反應出時序代表性與政策應用意義。

根據 InVEST 模型碳儲存模組之運作需求，需將土地利用資料以網格 (Grid) 形式表示。為此，本研究將國土利用調查成果圖 (shapefile 向量格式) 轉換為網格資料格式，並透過 ArcGIS 10.8 軟體中的 Polygon to Raster 工具執行轉換程序。考量金門地區土地面積相對台灣本島縣市較小，為提升資料解析度與分析精度，本研究設定網格大小為 50 公尺 × 50 公尺。

本研究使用 2006 年、2013 年與 2021 年三個時期之國土利用調查成果資料，惟三個時期採用之分類系統略有差異。為維持資料一致性，依據國土調查資料之發展脈絡，本研究將 2006 至 2015 年使用之分類體系，以及 2016 年後修訂之新版分類系統，作為資料處理與整併之基礎，並分別進行對應的歸類與轉換。

2006 年至 2015 年之分類系統，將土地利用劃分為三級結構：第一級共 9 類，包含農業用地、森林用地、交通用地、水利用地、建築用地、公共用地、遊憩用地、礦鹽用地與其他用地。第二級進一步細分為 41 類。第三級則再細分為 103 類，如稻作、旱作、果樹園、畜禽設施等。

2016 年後之分類系統，亦維持九大類的第一級分類，但第二級細分擴增為 48 類，第三級為 93 類 (如水田、草地等)，分類方式略有修正。

為進行後續 InVEST 模型操作與分析，本研究將兩類系統之土地利用分類進行整併與歸納，統一分類為六大類型：農業用地、草生地、森林用地、建成地、水體、裸生地，並作為後續碳儲存模擬與變遷分析之依據。

四、研究成果

(一) 各年度模型模擬結果分析

本研究以 InVEST 碳儲存模型模擬分析 2013–2021 年、2006–2021 年，以及 2006–2013 年三個時期金門地區之土地利用變遷與碳儲存量變化情形，分述如下：

1. 2013 年至 2021 年碳儲存空間分布與土地利用變遷關聯分析

2013 年金門地區以森林用地為主要土地利用類型，占研究區域總面積約 40%，其次為農業用地，占比約 21%。根據表 2 顯示，至 2021 年時，農業用地、草生地、建成地與水體等四類用地皆呈現面積增加趨勢，尤以農業用地增加最為顯著，達約 962.75 公頃；建成地次之，增加約 239 公頃；草生地與水體分別增加 113 公頃與 49.5 公頃。相對地，森林用地與裸生地面積則呈現減少，其中裸生地減少幅度最大，約 910.75 公頃，其次為森林用地，減少約 453.75 公頃。

此一土地利用變化對應於碳儲存量的空間分布變化，亦可於圖 1 與圖 2 中觀察。兩期碳儲存模擬結果皆顯示，大金門與小金門東側之碳儲存量高於西側。從總體碳儲存總量觀之，2013 年總碳儲存量為 1,852,150.50 公噸 (Mg C)，至 2021 年增至 1,881,041.50 公噸 (Mg C)，增加約 28,891 公噸，主要增量來源為農業用地之擴張。

此外，圖 3 顯示 2013 至 2021 年間碳儲存量變化之空間分布情形：綠色區域代表碳儲存量增加，紅色區域則為碳儲存量減少。碳儲存量增加區域呈點狀零星分布於各地，而減少區域則以大片且集中分布為主，顯示部分森林轉為開發用地或其他非森林用途，對生態系統碳儲存造成壓力。

表 2 研究地區 2013 年與 2021 年土地利用變遷表

土地利用類型	土地面積(公頃)	佔該類面積比例(%)	佔總面積比例(%)
農業用地	962.75	29.18	6.33
草地	113.25	43.81	0.74
森林用地	-453.75	-7.51	-2.98
建成地	239.00	10.64	1.57
水體	49.50	3.52	0.33
裸生地	-910.75	-46.64	-5.99

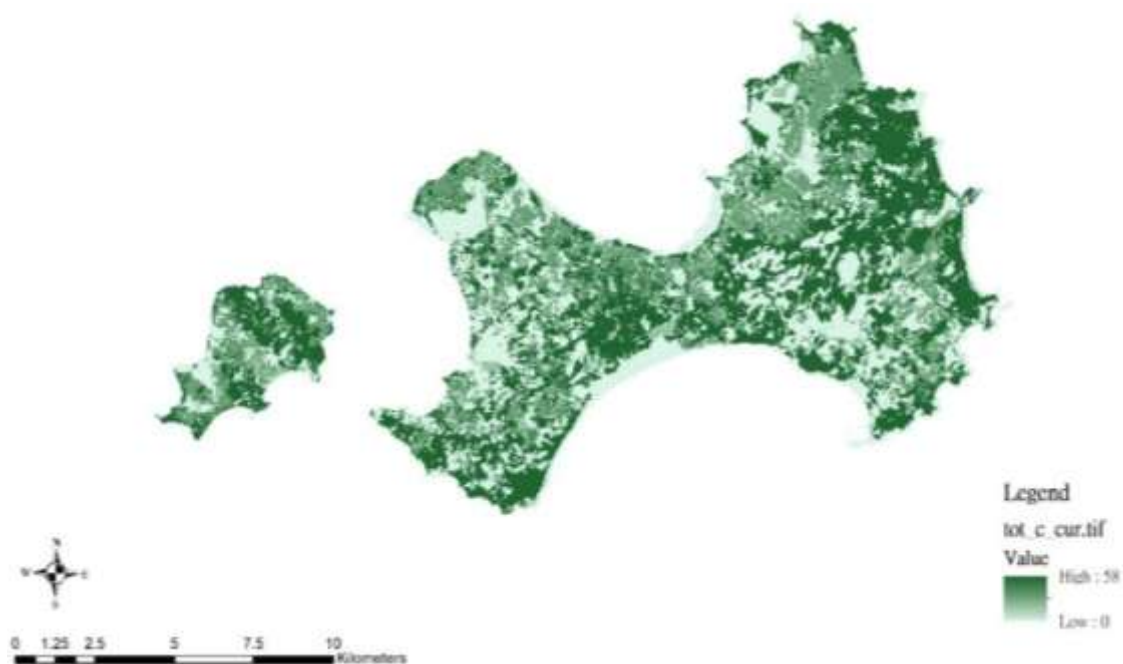


圖 1 研究地區 2013 年碳儲存量分布圖



圖 2 研究地區 2021 年碳儲存量分布圖

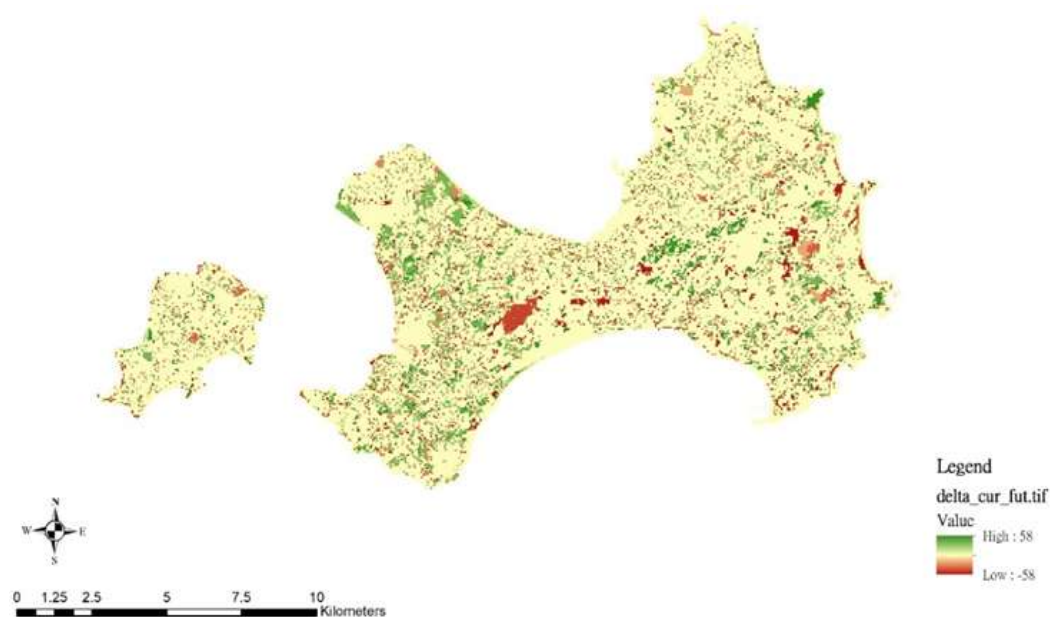


圖 3 研究地區 2013 年至 2021 年碳儲存量空間分佈變化圖

表 3 顯示本研究區域於 2013 年至 2021 年間之土地利用變遷矩陣。相關資料係根據土地分類準則，將 2013 年與 2021 年之國土利用現況圖進行重新分類，並利用 ArcGIS 10.8 軟體中的 Polygon to Raster 工具將向量資料轉換為 50 公尺 × 50 公尺之網格資料，進行逐格對位分析，產出土地利用變遷矩陣。

比較兩時期土地利用對應於碳儲存之轉換狀況，結果顯示 2013 年至 2021 年間整體碳儲存量增加之主要原因在於裸生地轉變為農業用地與森林用地。其中，裸生地轉為農業用地的區域主要分布於大金門西側金寧鄉北部；而裸生地轉為森林用地則集中於大武山區域，詳見圖 3。

儘管整體碳儲存量呈現上升趨勢，進一步將圖 3 與圖 4 進行疊圖比較後亦可觀察到多項土地利用變遷類型對碳儲存造成負面影響，例如：農業用地轉為裸生地、森林用地轉為裸生地，以及森林用地轉為草生地等皆導致碳儲存量下降。其中，農業用地及森林用地轉為裸生地之區域分布零散，較無集中趨勢；但森林用地轉為草生地則集中於金門國家公園中山林遊憩區之西側，推測此變遷與國土利用現況由森林使用土地轉變為公園綠地廣場有關，顯示人工綠地雖具景觀與遊憩功能，然其碳儲存能力相較森林明顯較低，亦應於後續空間管理中加以權衡考量。

表 3 研究地區 2013 年至 2021 年土地利用變遷矩陣表

2013 年土地利用類型	2021 年土地利用類型 (單位:公頃)					
	農業用地	草生地	森林用地	建成地	水體	裸生地
農業用地	2882.75	1.00	123.25	166.00	18.75	107.25
草生地	14.25	127.50	20.00	55.50	18.50	22.75
森林用地	461.50	137.50	4840.25	227.50	92.75	282.00
建成地	114.25	24.25	162.00	1791.75	16.50	137.00
水體	28.25	33.75	36.00	51.50	1172.25	84.50
裸生地	760.75	47.75	406.25	192.50	137.00	408.50
轉移面積合計	1379.00	244.25	747.50	693.00	283.50	633.50

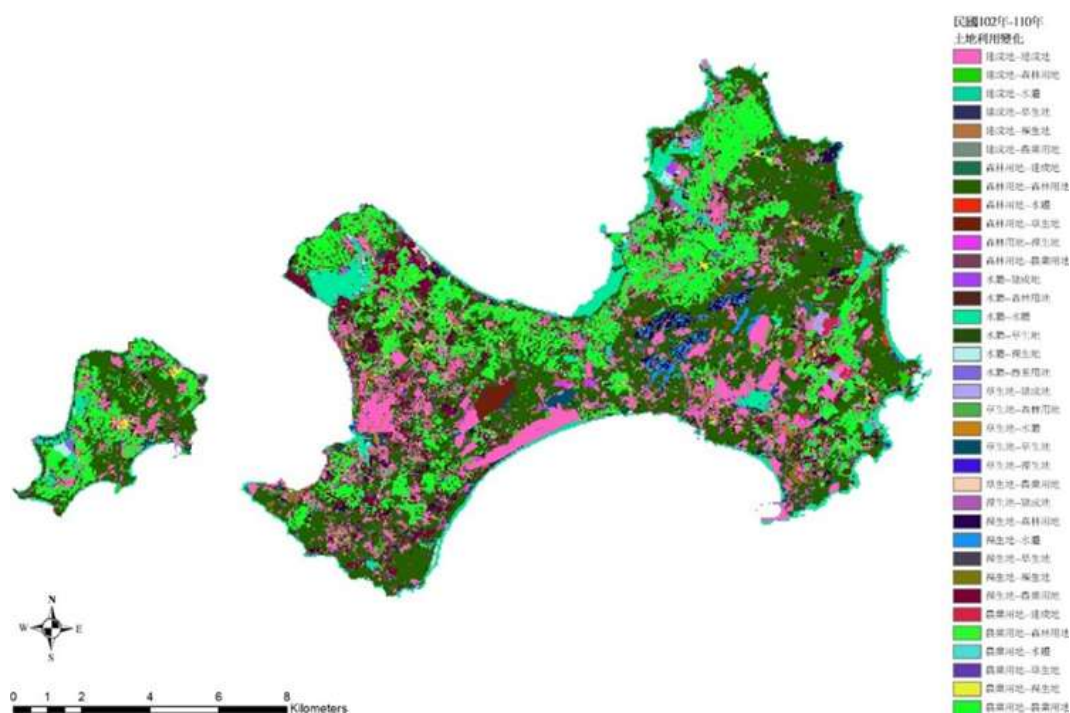


圖 4 研究地區 2013 年至 2021 年土地利用變遷圖

2. 2006 年至 2013 年碳儲存空間分布與土地利用變遷關聯分析

根據表 4 顯示，2006 年至 2013 年期間，金門地區之土地利用出現明顯變化。草生地、建成地與裸生地三類用地呈現面積增加趨勢，其中以裸生地增加面積最大，達 1,487 公頃；建成地次之，增加 282.5 公頃；草地面積則呈小幅成長。

相對地，農業用地、森林用地與水體則有明顯減少趨勢。其中農業用地減少最多，面積縮減 1,170.3 公頃；其次為森林用地，減少 413.5 公頃；水體減少面積相對較小，為 236.5 公頃。上述土地利用變遷對應之碳儲存影響，可透過圖 1 與圖 5 進行觀察。從總體碳儲存量角度分析（如圖 5 所示），2006 年金門地區之總碳儲存量為 2,097,782.00 公噸（Mg C），至 2013 年減少為 1,852,150.50 公噸（如圖 1 所示），整體減幅為 245,631.50 公噸，顯示此階段土地開發對碳儲存造成實質衝擊。

空間分布方面，2006 年與 2013 年之碳儲存量地圖皆顯示大金門與小金門東側之碳儲存總量普遍高於西側（如圖 7 所示），推測與東側分布較多森林與農業用地有關；而西側因開發活動較密集，導致碳儲存潛力相對較低。

整體而言，2006–2013 年期間土地利用變遷對碳儲存產生明顯負向影響，主要反映於森林用地與農業用地之減少，及裸生地與建成地之擴張，顯示此階段金門地區之開發趨勢已對生態系統碳儲存服務構成挑戰。

表 4 金門縣 2006 年與 2013 年各類型土地利用面積變化表

土地利用類型	土地面積(公頃)	佔該類面積比例(%)	佔總面積比例(%)
農業用地	-1170.3	-26.18	-7.69
草生地	50.75	24.43	0.33
森林用地	-413.5	-6.41	-2.72
建成地	282.5	14.39	1.86
水體	-236.5	-14.38	-1.55
裸生地	1487	319.27	9.77

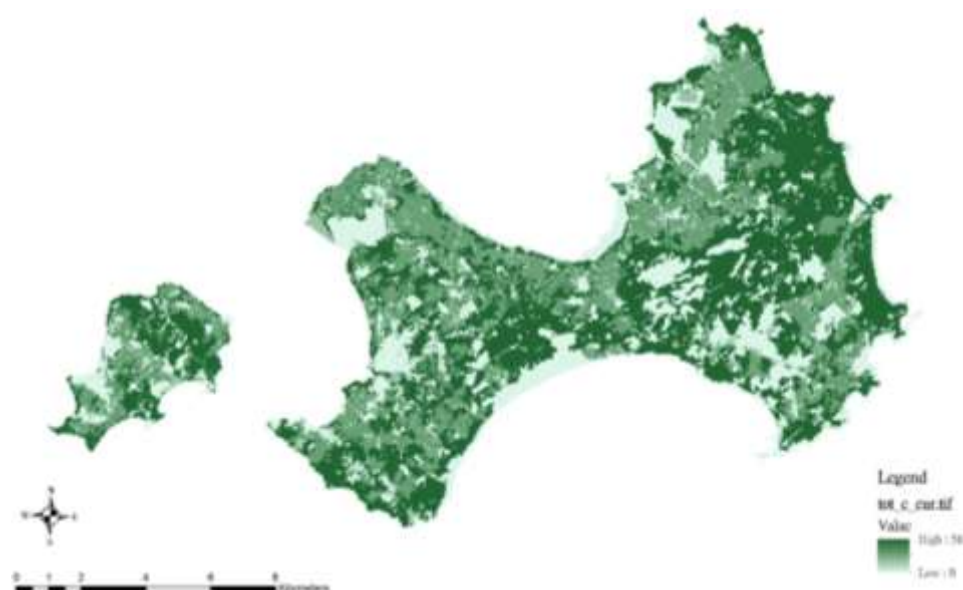


圖 5 研究地區 2006 年碳儲存量分布圖

本研究區域於 2006 年至 2013 年間的碳儲存量空間分布變化如圖 6 所示，呈現零星分布現象，顯示碳儲存量變化在區域內具高度異質性。將該時期碳儲存變化圖層疊合土地利用變遷圖（圖 7）及變遷矩陣分析結果（表 5），可進一步說明造成碳儲存下降的主要土地利用轉換型態。

碳儲存量減少的區域主要集中於金城鎮與金湖鎮等人口聚集區之外圍，該區域原為農業用地或森林用地，後期轉為建成地或裸生地，顯示都市擴張與土地開發活動為導致碳儲存下降之主要推力。

根據表 5 所示，2006 年至 2013 年間「農業用地轉為裸生地」之轉換面積約為 824.5 公頃，占有土地轉換總面積之 20%，為導致碳儲存量下降的主要因素。其次為「森林用地轉為裸生地」，轉換面積約 449.75 公頃，占總轉移面積的約 12%。綜合上述分析結果可知，碳儲存量下降與農業與森林用地流失高度相關，特別是在城鎮擴張與裸露地面擴增明顯區域。此結果亦支持本研究對於土地利用轉型與生態系統服務變化之假設，突顯整合空間規劃與碳管理策略之必要性。

表 5 研究地區 2006 年至 2013 年間土地利用變遷矩陣表

2006 年土地利用類型	2013 年土地利用類型 (單位:公頃)					
	農業用地	草地	森林用地	建成地	水體	裸生地
農業用地	2984.25	9.00	403.75	203.00	44.75	824.50
草地	2.75	97.75	29.75	17.75	20.25	39.50
森林用地	189.50	56.50	5374.75	331.00	53.50	449.75
建成地	72.75	65.25	120.25	1564.75	18.25	122.00
水體	11.00	17.50	59.00	38.25	1260.75	258.50
裸生地	38.75	12.50	54.00	91.00	11.00	258.50
轉移面積合計	314.75	160.75	666.75	681.00	147.75	1694.25

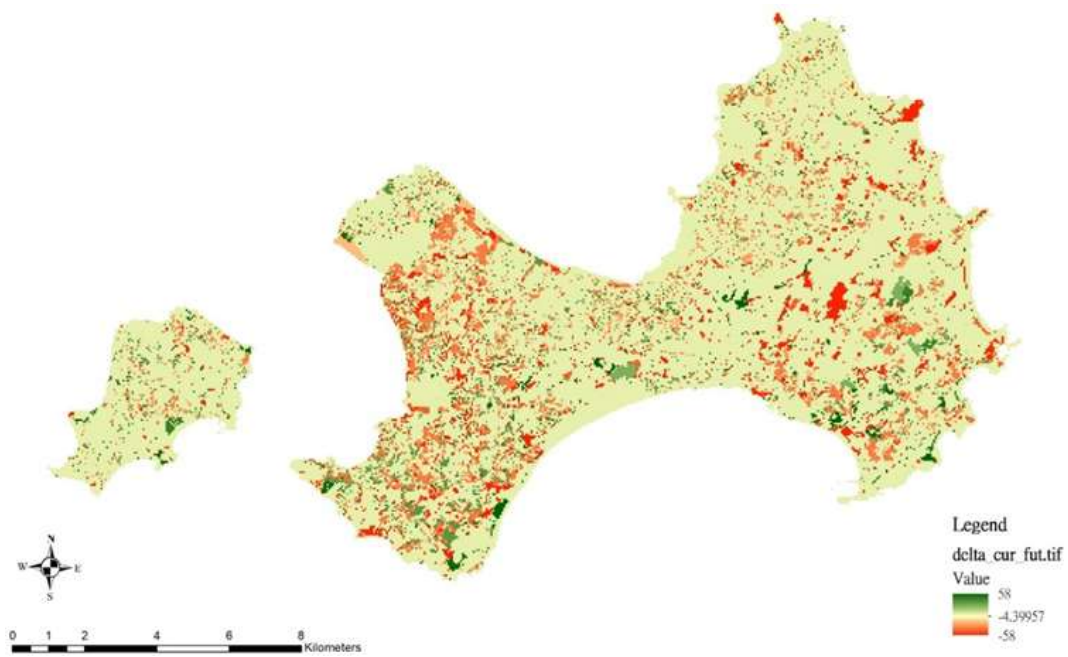


圖 6 研究地區 2006 年至 2013 年碳儲存量空間分佈變化圖

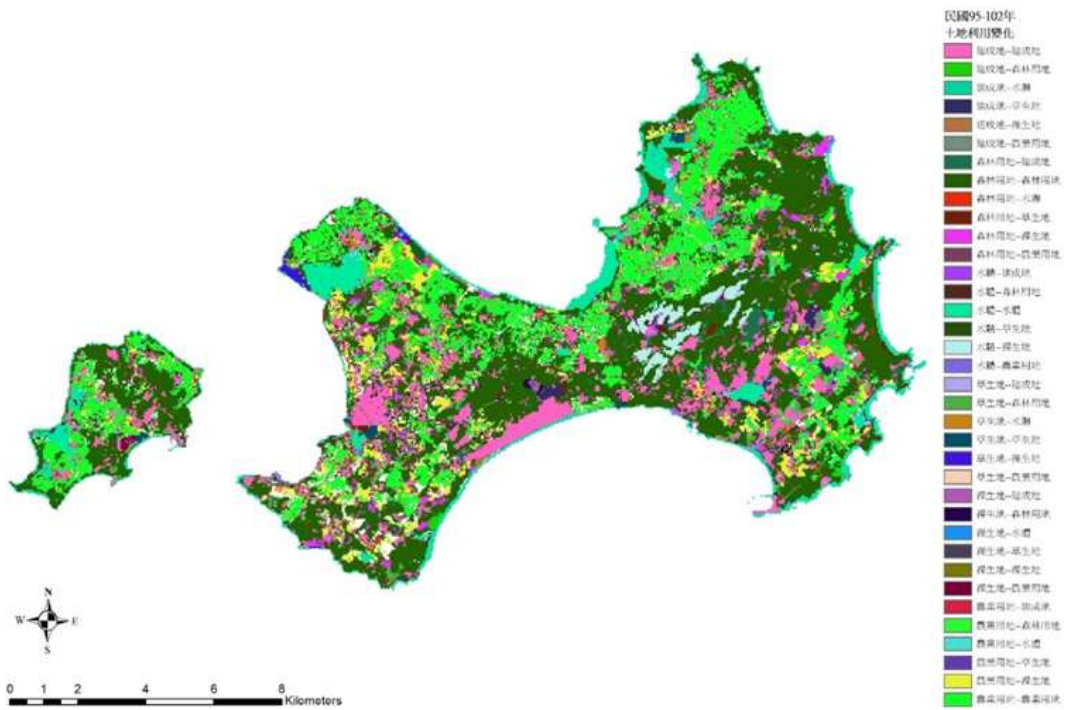


圖 7 研究地區 2006 年至 2013 年土地利用變遷圖

3. 2006 年至 2021 年碳儲存空間分布與土地利用變遷關聯分析

根據表 6 比較 2006 年與 2021 年兩時期土地利用資料顯示，草生地、建成地與裸生地面積皆呈現增加趨勢。其中，以裸生地增加面積最大，達 576.25 公頃；建成地次之，增加 521.50 公頃。相對地，農業用地、森林用地與水體面積則呈現減少趨勢，其中森林用地減少面積最為顯著，達 867.25 公頃；農業用地次之，減少 207.5 公頃；水體則減少 187 公頃。

整體碳儲存量方面，2006 年金門地區總碳儲存量為 2,097,782.00 公噸(Mg C)，至 2021 年降為 1,881,041.50 公噸，減少 216,740.50 公噸，顯示近十多年來碳儲存量呈現明顯下降趨勢。碳儲存空間分布圖（圖 5）亦顯示，大、小金門東側碳儲存量普遍高於西側。

從碳儲存變化之空間分布情形觀察（圖 8），2006 年至 2021 年間整體變化仍呈零星分布，但太武山地區之碳儲存量則有明顯增加。根據土地利用變遷圖（圖 9）及變遷矩陣交叉分析（表 7）顯示，該區域係由原礁岩轉變為森林用地所致。此外，部分零星區域亦出現碳儲存量增加，主因為建成地轉為農業用地或森林用地。

至於碳儲存量減少區域，則集中於大金門東部，其主因為森林用地轉為軍事設施或公共利用土地。其他零星減少地區則與森林用地轉為農業用地、建成地或裸生地，以及農業用地轉為建成地等轉換型態有關。

根據表 7 資料顯示：森林用地轉為農業用地面積達 629.5 公頃，占總土地轉換面積約 15%；森林用地轉為建成地面積約 405.25 公頃，占 10%；森林用地轉為裸生地面積約 367.5 公頃，占 9%。

綜合分析可知，森林用地轉為農業用地、建成地與裸生地，為導致本區域 2006 年至 2021 年碳儲存量整體下降之主要原因。

表 6 金門縣 2006 年與 2021 年各類型土地利用面積變化表

土地利用類型	土地面積(公頃)	佔該類面積比例(%)	佔總面積比例(%)
農業用地	-207.5	-4.64	-1.36
草生地	164	78.94	1.08
森林用地	-867.25	-13.44	-5.70
建成地	521.5	26.56	3.43
水體	-187	-11.32	-1.23
裸生地	576.25	123.73	3.79

表 7 研究地區 2006 年至 2021 年間土地利用變遷矩陣表

2006 年土地利用類型	2021 年土地利用類型 (單位:公頃)						
	農業用地	草生地	森林用地	建成地	水體	裸生地	轉移面積合計
農業用地	3399.75	12.25	433.00	286.75	50.75	286.75	1069.50
草生地	42.00	76.00	24.75	25.75	24.75	14.50	131.75
森林用地	629.50	170.25	4766.25	405.25	116.25	367.50	1688.75
建成地	60.50	42.25	121.00	1592.75	18.00	128.750	370.50
水體	22.25	50.75	170.50	65.75	1244.25	98.25	407.50
裸生地	107.75	20.25	72.25	108.50	10.75	146.25	319.50
轉移面積合計	862.00	295.75	821.50	892.00	220.50	895.75	3987.50

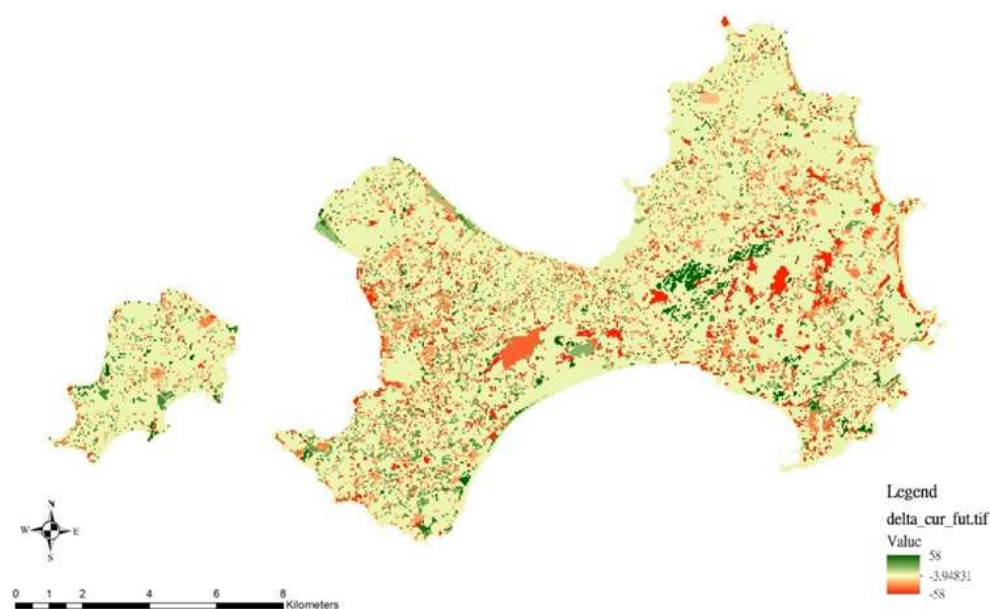


圖 8 研究地區 2006 年至 2021 年碳儲存量空間分佈變化圖

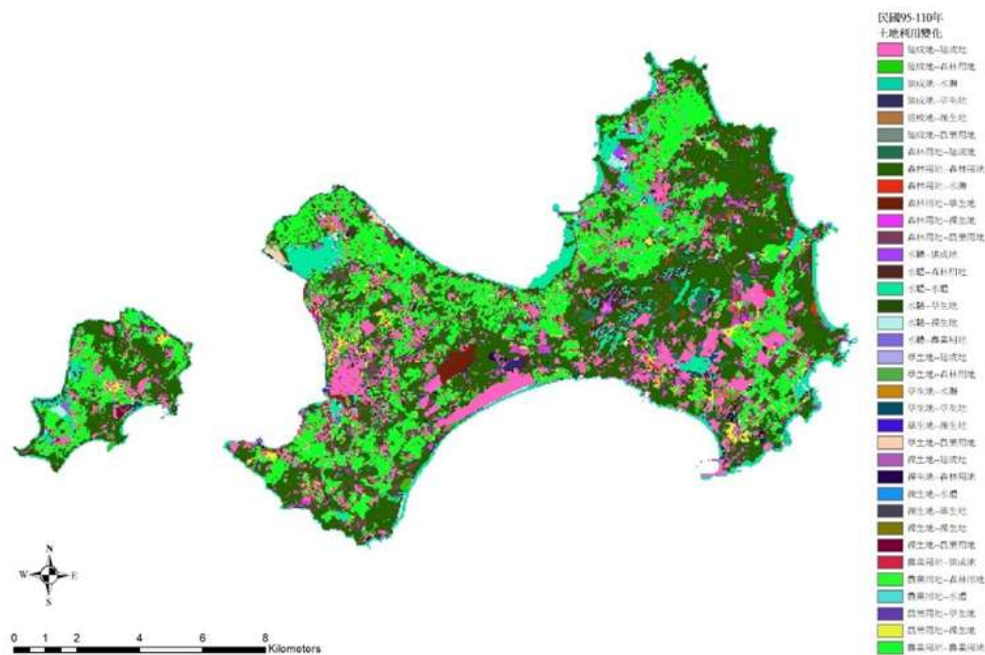


圖 9 研究地區 2006 年至 2021 年土地利用變遷圖

(二) 各時期碳儲存空間分布與土地利用變遷關聯分析

綜合表 8、表 9 與圖 10 進行交叉分析後可知，金門地區於 2006 年、2013 年與 2021 年三個時期之主要土地利用類型面積變化與碳儲存量變化呈現高度關聯性。在 2006 年至 2013 年 期間，農業用地面積呈現明顯減少趨勢，導致總體碳儲存量減少約 151,305.90 Mg C，為該時期碳儲存下降的主因。而在 2013 年至 2021 年 期間，農業用地則轉為增加趨勢，對應碳儲存量增加約 124,925.53 Mg C，顯示農業用地面積之增減對區域碳儲存具有關鍵影響力。因此，保護農業用地、減少其流失，對於維持金門地區整體碳儲存能力具關鍵性作用。

草地雖於兩時期皆呈現持續增加，但因總面積占比較低，對總體碳儲存量之影響有限。2006 年至 2013 年草地所貢獻碳儲存增加量僅為 3,655.72 Mg C，2013 年至 2021 年則為 7,707.76 Mg C，總體變化不具顯著性。

森林用地則於兩階段皆持續減少，對整體碳儲存造成重大負面影響。在 2006–2013 年期間，森林用地流失導致碳儲存量減少 98,436.98 Mg C；而於 2013–2021 年間，進一步減少 105,348.88 Mg C，合計為總體碳儲存下降之另一主要來源。由此可知，遏止森林用地流失亦為維持區域碳儲存功能之關鍵策略。至於建成地、水體與裸生地，依 InVEST 碳儲存模型設定，皆視為不具碳儲存能力的土地利用類型，故於本研究中其碳儲存變化皆為 0 Mg C。

總體而言，本研究三期分析結果清楚指出：農業用地與森林用地之變化為主導金門地區碳儲存總量變動的關鍵因子。因此，未來國土規劃與土地管理政策應優先考量對上述兩類土地的保護與調控，以達成碳平衡與生態永續目標。

表 8 研究地區 2006 年、2013 年、2021 年三個時期土地利用類型變化表

土地利用類型		2006 年	2013 年	2021 年
農業用地	面積(ha)	4451.70	3296.69	4250.32
	比例(%)	29.25	21.67	27.94
草生地	面積(ha)	207.11	258.60	367.16
	比例(%)	1.36	1.70	2.41
森林用地	面積(ha)	6446.69	6022.39	5568.30
	比例(%)	42.36	39.58	36.60
建成地	面積(ha)	1972.58	2258.68	2496.13
	比例(%)	12.96	14.84	16.41
水體	面積(ha)	1672.00	1434.79	1481.21
	比例(%)	10.99	9.43	9.74
裸生地	面積(ha)	467.77	1944.89	1051.60
	比例(%)	3.07	12.78	6.91

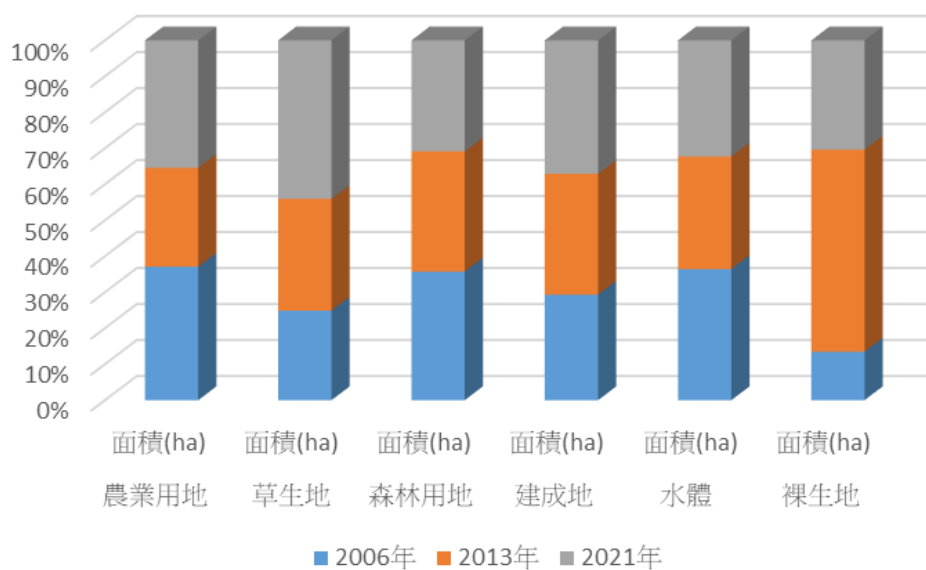


圖 10 研究地區 2006 年、2013 年、2021 年土地利用類型變化趨勢圖

表 9 研究地區各項土地利用碳儲存量變遷表

土地利用類型	2006 年	2013 年	2021 年
農業用地	583,172.29	431,866.39	556,791.92
草生地	14,704.88	18,360.60	26,068.36
森林用地	1,495,631.46	1,397,194.48	1,291,845.60
建成地	0.00	0.00	0.00
水體	0.00	0.00	0.00

土地利用 類型	2006 年	2013 年	2021 年
裸生地	0.00	0.00	0.00
總和 (Mg/C)	2,093,508.63	1,847,421.47	1,874,705.88
土地利用 類型	2006 年至 2013 年之 變化量	2006 年至 2021 年之 變化量	2013 年至 2021 年之 變化量
農業用地	-151,305.90	-26,380.37	124,925.53
草生地	3,655.72	11,363.48	7,707.76
森林用地	-98,436.98	-203,785.86	-105,348.88
建成地	0.00	0.00	0.00
水體	0.00	0.00	0.00
裸生地	0.00	0.00	0.00
總和 (Mg/C)	-246,087.16	-218,802.75	27,284.41

(三) 研究成果綜整

綜合本研究對 2006、2013 與 2021 年金門地區土地利用變遷與碳儲存空間分布之分析，歸納如下整體趨勢與發現：

1. 土地利用型態轉換方向明確：原屬軍事或自然草生地類型之用地，在觀光推動與建設政策導向下，逐步轉為建成地、旅遊相關設施或閒置空間，尤以近水岸地區與舊軍事設施集中地帶最為明顯。
2. 碳儲存總量呈下降趨勢，空間分布向非核心區域外移：三期碳儲模型顯示整體碳儲總量由 2006 年至 2021 年呈逐步下降趨勢，且高碳儲潛勢區由中央高地向周邊非建成區緩慢外移，反映人為開發壓力集中於聚落及觀光核心區。
3. 政策介入與空間管制效果具空間異質性：金門國家公園範圍內之部分聚落與自然區域仍維持較穩定的碳儲狀況，顯示園區制度對土地利用變遷具有一定緩衝效果，惟聚落邊界地區與非園區範圍則變化劇烈。
4. 聚落保存與碳儲潛能具雙重效益潛力：以瓊林聚落為例，傳統聚落維持高綠覆環境與文化景觀，具備兼顧文化保存與生態固碳潛力，未來可作為兼顧生態與歷史空間再利用的重要範例。

綜上所述，金門地區在歷經戰地政務解除、觀光開發與國家公園制度導入後，其土地利用轉型與碳儲潛能展現出明確時序性與空間異質性特徵。政策干預之空間配置與土地管制機制，將深刻影響生態碳匯穩定性與未來碳治理策略選擇。

五、 結論與建議

(一) 結論

本研究從生態系統服務觀點出發，探討金門地區自 2006 年至 2021 年期間之碳儲存量空間分布變化趨勢，據以提出對國土規劃實務之建議。綜合研究結果，歸納以下結論：

1. 生態系統服務碳儲存量影響分析

- (1) 為達成淨零排放目標，掌握土地碳儲存量為重要基礎。本研究運用 InVEST 模型計算金門地區 2006 年、2013 年與 2021 年三個時點之碳儲存總量，並分析其變化與分布趨勢，進而辨識碳儲存變化顯著區域。
- (2) 2006 年至 2021 年間，金門地區整體碳儲存量呈零星變化格局，其中太武山區碳儲存量增加最為顯著，其餘增加區域亦多為零星分布；相對地，大金門東部則為碳儲存量下降主要區域。
- (3) 造成碳儲存量下降之主要原因為森林用地遭轉為建成地。林地為碳儲存量最高之土地利用型態，其流失將造成碳匯功能之顯著減損。
- (4) 本研究初步建立金門區域之碳儲存空間模型，未來可應用於綠色基盤規劃、生態敏感區保護界定、及作為開發許可之碳損益評估基礎。

2. 對國土規劃之建議

- (1) 國土規劃應優先保育自然生態系統，特別是森林、農地、濕地與海岸資源。應透過增加森林面積與新植造林，強化森林碳匯功能。
- (2) 過往國土計畫未納入碳儲存量指導原則，未來應結合現況環境資料進行科學化評估，精確掌握土地利用變化對碳儲存之影響。依據《國土計畫法》第 19 條與第 43 條，應整合碳儲存資訊納入國土計畫基礎資料及研究專責法人，以確保土地利用規劃朝向永續經營發展。
- (3) 對於農業用地轉為城鄉用地所造成之碳儲存損失，可建立異地補償機制，透過審議制度進行碳損補償。換言之，未來國土功能分區擬定應將碳儲存量作為空間評估指標之一，特別針對森林與農業用地轉型需建立碳損益分析機制，作為開發許可與保育補償依據。
- (4) 透過土地使用管制項目，如綠覆率、法定空地配置等規範，提升建成區碳中和能力，並建立開發前後碳儲存變化比對與補償制度，達成國土碳平衡。
- (5) 國土發展之推動需結合全民參與與認同，建議國土計畫推動初期，可透過講座、課程、資訊平台、媒體等形式強化與民眾之互動與知識傳播，提升對碳匯與國土安全議題之關注與實踐參與。

3. 研究發現綜整

- (1) 碳儲潛能總體下降，且空間變化具明顯異質性：三期分析結果顯示碳儲總量由 2006 年至 2021 年逐步下降，變化主要集中於軍事釋出區與觀光設施發展區，尤其建成地擴張對碳損具有顯著影響。

- (2) 國家公園區域具碳儲穩定效應：國家公園涵蓋區域因嚴格土地使用與開發管制，呈現較穩定的碳儲結構，證實制度化生態保育政策對離島型區域具有碳匯保護功能。
- (3) 土地利用類型轉換與碳儲損益具明確對應關係：例如耕地轉為建成地將導致顯著碳儲損失，而草生地或混合綠覆區的擴展則可能提供碳儲補償效益。

(二) 研究展望與應用限制

1. 研究展望

本研究所呈現之碳儲存變遷趨勢，除反映土地利用型態本身的生態貢獻差異外，其空間分布亦與金門地區歷年政策導向密切相關。1995 年金門國家公園設立初期，主要聚焦於軍事遺構保存與生態敏感區（如濕地）之保育，對於土地開發採取相對保守的管控策略。2000 年後，配合閩南文化資產保存與觀光導向之轉型需求，公部門陸續推動聚落整建（如瓊林、山后）、閒置軍地再利用（如馬山、北山等）以及小三通啟動所帶動的公共設施開發，逐步改變原有的土地覆蓋組成。

此外，金門縣政府於 2010 年代以後推行多項與觀光發展與土地活化相關計畫，例如「水頭觀光聚落再生計畫」、「山后民俗文化村更新工程」與閒置營區轉型策略，皆對低碳覆蓋土地轉變為建成型態產生實質影響。此政策轉變亦可佐證本研究中建成地擴張與碳儲總量下降之趨勢。因此，未來相關研究若能結合完整的區域土地政策與年度施政紀錄，將有助於更細緻釐清人為決策對碳儲空間演變之驅動機制。

然而，於未來實務應用或推廣至其他區域時，仍需留意下列事項：

- (1) 跨部門資料整合機制之建立：碳儲評估須仰賴多源空間資料與在地監測資訊，建議未來透過縣市政府、國家公園、林業署與環境部等單位協作，建立長期整合資料平台，提升時效性與判讀力。
- (2) 碳儲轉譯指標與決策界面設計：為利政策採納與大眾理解，建議建立易於解釋之指標（如單位土地碳儲效率、開發型態碳損成本），並結合圖資平台提供可視化結果。
- (3) 不同區位適用性之測試與擴充：金門為具特殊歷史與政策背景之島嶼型區域，若應用至都會邊陲、農村轉型區或海岸濕地等場域，須調整參數設定與分類基準，避免模型誤差擴大。

2. 應用限制

本研究使用 InVEST 模型進行碳儲存與固碳潛勢模擬，所採用之碳庫參數係根據 IPCC (2006) 指南與 InVEST 3.2.0 模型內建資料庫進行設定。雖具備廣泛應用性與可比較性，惟相關參數多源於全球平均值或其他區域性研究成果，與金門地區實際生態系類型及土壤碳含量可能存在差異，尤其在林地類型、裸地土壤與退化農地等情境下，其碳儲存能力可能因土壤性質、管理方式及微氣候條件而有所不同。

此外，現階段研究尚未納入現地實測之土壤碳或植被碳資料進行參數驗證，未來可藉由長期監測與碳庫樣區建立，進一步調整與優化碳庫參數，以提升模擬結果之區域代表性與決策依據的精確度。

(三) 後續研究建議

1. 目前國土利用調查中土地分類與實際使用狀況仍存在落差，建議未來調查制度應優化分類定義與標準，以利提升土地類型歸類準確度。
2. 為提升碳儲存估算精度，應進一步蒐集本土實測參數與碳儲存係數資料，避免僅依文獻數值估算之誤差。
3. 由於本研究採用之碳庫係數主要參照 IPCC 指南與 InVEST 3.2.0 模型預設值，雖具國際通用性，惟尚未完全導入台灣本土實測數據，後續應進一步補強田野監測與參數校準，以提升估算準確度。
4. 本研究採用六大類土地分類，雖足以支援區域尺度分析，但於碳交易與補償制度應用上，仍需進一步細分如作物類型、綠覆率等空間特徵，建議後續研究導入高解析分類資料或遙測影像以細緻化模型輸入。
5. 本研究以 2006、2013、2021 三期資料為分析基礎，時間間隔略長，可能低估短期裸露地擴張或氣候災害引致之臨時變異，後續研究可考慮引入年際影像或無人機高頻調查資料補強。
6. 目前尚未區分綠碳、藍碳與黃碳儲存潛能，建議可依據陸地（森林農地）、水域（藻類濕地）與建成區（土壤與建築碳儲）建立對應資料架構與模組參數，逐步建立分類精度與資料庫基礎，導向可用於政策評估之碳型模擬模型。
7. 本研究以碳儲存為主軸，未能涵蓋如「棲地品質」、「藍碳潛力」、「景觀美學價值」等生態系統服務面向。未來倘若相關空間與統計資料更加完備，建議進一步拓展研究主題，綜合評估土地利用變遷對多元生態服務之影響。

誌謝

本研究為內政部國土管理署城鄉發展分署「國土規劃量能提升及人才培養交流平台（區域規劃中心）」（標案案號：UR-11118）委託專業服務案之一部分，對於研究經費之支持，謹此致謝。

參考文獻

- Bargiel S., Rabenorosoa K., Clecy C., Gorecki C., and Lutz P. (2010). Toward Micro-Assembly of Hybrid MOEMS Compon Silicon Free-Space Micro-Optical Bench. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(4), pp. 5012.
- Biggs, R., Maja Schlüter, Duan Biggs, Erin L. Bohensky, Shauna BurnSilver, Georgina Cundill, Vasilis Dakos, Tim M. Daw, Louisa S. Evans, Karen Kotschy, Anne M. Leitch, Chanda Meek, Allyson Quinlan, Ciara Raudsepp-Hearne, Martin D. Robards, Michael L. Schoon, Lisen Schultz,1 and Paul C. West. (2012) Toward Principles for Enhancing the Resilience of Ecosystem Services. *Annual Review of Environment and Resources*, 37, pp. 421-448.

- Bagstad, K. J., Semmens, D. J., Waage, S., & Winthrop, R. (2013). A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 5, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.004>
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neil, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), pp. 253–260.
- Daily, G. C. (1997). *Nature's services: Societal Dependence on Natural Ecosystem*. Washington DC : Island Press.
- Englund D.A., K.A. Murach, C.M. Dungan, V.C. Figueiredo, I.J. Vechetti Jr., E.E. Dupont-Versteegden, J.J. McCarthy, C.A. (2020). Peterson Depletion of resident muscle stem cells negatively impacts running volume, physical function, and muscle fiber hypertrophy in response to lifelong physical activity *Am. J. Physiol. Cell Physiol.*, 318, C1178-C1188.
- Haines-Young R.H. & Potschin M.P., (2010). The links between biodiversity, ecosystem services and human wellbeing. *Ecosystem Ecology: a new synthesis*, eds. Raffaelli DG & Frid CLJ (Cambridge University Press), 162.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: synthesis / A Framework for Assessment* , Millennium Ecosystem Assessment Synthesis Report. Island Press, Washington, DC.
- SCEP. (1970). *Man's Impact on the Global. Environment*. Massachusetts: MIT Press.
- Sharp, R., Tallis, H., Ricketts, T., Guerry, A., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., ... & Douglass, J. (2020). InVEST 3.9.1 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University.
- Tallis, H., Kareiva, P., Marvier, M., & Chang, A. (2008). An ecosystem services framework to support both practical conservation and economic development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(28), 9457–9464. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705797105>
- Tallis H T, Ricketts T, Nelson E, Ennaanay D. (2013). InVEST 2.5.4 User's Guide . Stanford : The Natural Capital Project.
- Vallet, A. (2021). Ecosystem services modeling with InVEST. *EJP SOIL*.
- Vallet, A., Locatelli, B., Levrel, H., Wunder, S., & Delmas, M. (2016). Dynamics of ecosystem services during forest transitions in Reventazón, Costa Rica. *PLOS ONE*, 11(7), e0158615. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158615>
- Westman, W. E. (1977). How Much Are Nature's Services Worth? *Science*. 197(4307), 960-4.

- Wang, R., Zhao, J., Chen, G., Lin, Y., Yang, A., & Cheng, J. (2023). Coupling PLUS–InVEST model for ecosystem service research in Yunnan Province, China. *Sustainability*, 15(1), 271. <https://doi.org/10.3390/su15010271>
- Wu, S., Liu, K.-D., Zhang, W., Dou, Y., Chen, Y., & Li, D. (2023). To better understand realized ecosystem services: An integrated analysis framework of supply, demand, flow and use. *arXiv preprint arXiv:2309.15574*.

以衛星大數據觀察長期國土變遷-以外傘頂洲為例

陳聿新¹ 朱宏杰^{2*} 盧韋勳³

論文收件日期：114.04.23

論文修改日期：114.05.21

論文接受日期：114.05.26

摘 要

本研究利用衛星大數據分析長期的國土變化，針對嘉義東石漁港外的外傘頂洲進行海岸線變遷的觀察與分析。透過衛星影像的判釋與處理，包括邊緣偵測技術，快速識別出外傘頂洲海岸線的變化情況及估計移動距離，本研究以1991年至2021年近三十年的衛星影像資料，估算外傘頂洲區域的變遷及其移動情形。經過三十年的觀測，發現外傘頂洲受波浪、沿岸流及東北季風的影響，正逐漸向西南方向漂移，本研究估計外傘頂洲的移動距離：北端的整體移動距離約為3312公尺，而南端的移動距離則約為3708公尺。

根據長期變化速率的分析，透過空間資訊進行快速估算，發現外傘頂洲的北端每年向西南方向移動約90公尺，南端則向東移動約150公尺，這些變化資訊對於相關單位而言極為重要，應予以充分重視。

關鍵詞：外傘頂洲、沙洲、邊緣偵測、衛星大數據

¹ 碩士，國立成功大學測量及空間資訊學系。

^{2*} 教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

³ 助理研究員，國立成功大學水工試驗所。

* 通訊作者，TEL:(06)2757575 # 63827, E-mail: honejaychu@geomatics.ncku.edu.tw。

Observing Long-term Territorial Changes Through Spatial Big Data: A Case Study of Waisanding Sand Bar

Yu-Xin Chen¹, Hone-Jay Chu^{2*}, Wei-Shiun Lu³

Abstract

This study analyzes the long-term changes in national territory using satellite big data, focusing on the coastal changes of Waisanding sand bar located outside of Dongshi Fishing Harbor. By interpreting and processing satellite imagery, including edge detection, we identify the coastline changes of Waisanding sand bar. We estimate the movement changes of the island's region by observing satellite images from 1991 to 2021 over nearly three decades. Waisanding sand bar, influenced by waves, coastal currents, and the northeast monsoon, is drifting towards the southwest. We have also estimated the displacement of Waisanding sand bar over the past 30 years. The total displacement of the northern part of the island is approximately 3,312 meters, while the southern part has moved about 3,708 meters.

Through the analysis of long-term change rates and rapid spatial information estimation, we found that the top of Waisanding sand bar moves southwestward by about 90 meters per year, while the southern end moves eastward by approximately 150 meters annually. This information is of great importance and should be taken into consideration by relevant authorities.

Keywords: edge detection, sand bar, satellite big data, Waisanding sand bar

¹ Master, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.

² * Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University..

³ Assistant Researcher, Tainan Hydraulics Laboratory, National Cheng Kung University.

* Corresponding Author, TEL:(06)2757575 # 63827, E-mail: honejaychu@geomatics.ncku.edu.tw.

一、前言

隨著全球變異及國土監測需求的增加，快速且準確地偵測海岸線(灘線，本研究指的是零米高程線)變化成為遙測領域的重要研究課題，尤其在氣候變遷和人類活動的影響下，海岸線變遷如侵蝕、土地淹沒和人為開發等問題日益凸顯。

遙測技術的不斷進步，衛星影像具有大範圍監測之優點，藉由衛星影像進行水體識別與灘線偵測，國內外學者皆提出以遙測技術來監測沙洲變化的技術，Rogers等(2021)開發灘線提取自動化工具，該工具可以從遙測影像中提取海岸植被線，估算沙質海岸線的後退情況。Xia等(2021)使用影像、光達和現場取樣方法分析海南島灘線之時空變化。Giza等(2021)利用歷史航照數據和 GIS 技術定量分析了波羅的海沙丘區域的時空變化。Kouhgard等(2022)結合遙測技術和氣候數據監測加拿大 Sandbanks 省立公園的海岸線變化。陳與朱(2024)觀察從1991年至2021年近三十年的衛星影像來估計曾文溪口濕地區域的面積變化，雖不在劃定好的黑面琵鷺保護區內，但也是緊鄰於其旁，三十年之間，曾文溪出海口沙洲變遷，海岸線退縮最嚴重處退縮速率約為每年41.8公尺。

位於嘉義東石漁港外的外傘頂洲，主要因濁水溪出海時挾帶大量的泥沙沖積而成。目前位於嘉義外海，故為嘉義沿海重要的防護沙洲，而在防護的同時，也提供給了嘉義沿海的養殖產業(大多數為養蚵)一個良好養殖區域。外傘頂洲因受到波浪、沿岸流及東北季風影響，正慢慢的往西南方向漂移，也因此被稱為「移動的國土」。近年來由於沙源減少，濁水溪及北港溪近年來的輸砂量減少，鄰近海埔地及離島工業區開發改變海岸地形張等(2017)，也連帶的影響到了外傘頂洲整體的面積範圍，使其逐漸縮小，使得嘉義沿海漸漸失去這座天然屏障。蕭等(2007)以多時期衛星影像分析2003年以前的外傘頂洲沙洲變化，但2004~2006年則利用高空間解析力與高精度DEM之空載光達資料，研判外傘頂洲地區的地形變化，亦可結合同步獲取之反射影像，清楚的輔助研判水陸邊界，並藉由地形資訊估算沙洲體積變化。張等(2017)應用IHS轉換法、形態學及Canny偵測等分析1994 至2015年的灘線及面積長期變化後發現，外傘頂洲在北端以每年30.5公尺，而南端以每年119公尺速度往內陸內縮，且變化有季節特性(夏季增加，但冬季減少)。彭等(2019)利用歷史衛星影像及潮汐模型求得外傘頂洲在過去不同時期的變化量及移動趨勢，發現外傘頂洲自1990年代起沙洲南北端的移動速度略有不同，其中南端移動速度比北端快，每年移動78.7 - 221.3 公尺。

在本次研究中，我們將透過衛星影像長期大數據快速觀察外傘頂洲近三十年之變遷情況，再以此空間大數據及影像處理來估計外傘頂洲北端及南端的移動距離變化，與估計其移動速率，以及藉由內政部國土測繪中心建置之e-GNSS之RTK定位資料評估以此方式進行灘線偵測誤差。

二、研究試區

本次研究區域是嘉義沿海重要的沙洲，即為東石漁港外的整個外傘頂洲，外傘頂洲為嘉義沿海養殖產業主要屏障，也是雲嘉南濱海國家風景區的景點之一。

圖1為研究範圍，範圍包括外傘頂洲的北端區域及外傘頂洲的南端區域，因為濁水溪流域蘊含的沙源豐富，而在出海時伴隨著大量的泥沙沖積而成，也是臺灣沿海最大的沙洲，因為外型似傘而得名。雖然行政劃分上屬雲林縣口湖鄉，現今絕大部份位於嘉義縣東石鄉東石漁港西方海上約14公里，外傘頂洲長約20公里，寬度1-3公里，面積約1000餘公頃，呈東北、西南走向。多年來受到颱風暴潮、水道治理、沿海土地開發及設施興建等影響，外傘頂洲由於沙源補助減少及海潮作用下，逐漸侵蝕消失。



圖1 研究範圍圖：外傘頂洲，包含距離變化量測線與驗證線方向

三、研究方法

(一) 衛星影像處理

研究步驟為衛星影像處理，首先在 Google Earth Engine (GEE) 平台觀察從 1991 年到 2021 年外傘頂洲之變化，接著下載 1991 年到 2021 年的 Landsat 5、7、8 的衛星合成影像，本研究以一年所有影像中各像素之第 25 百分位數的像素合併成那一年之代表影像，雲通常有較高的反射值，因此挑選反射值較低的像素值產生低含雲量影像張等人(2018)。當進行單張影像的海岸線偵測時，潮位的變化可能會對結果產生影響，因為每次潮汐變化都會導致海岸線的顯著波動。在這種情況下，單一時間點的影像可能無法真實反映穩定的海岸線位置。因此，使用合成影像進行海岸線偵測可以有效減少潮位變化的干擾。合成影像是將多張不同時間點的影像進行疊加，這樣可有效平均掉由潮汐波動帶來的影響。隨著影像數量的增加，潮位變化的影響會在合成過程中被平滑掉，這使得我們能夠避免因單張影像受潮位影響而導致的誤差。

(二) 指標影像二值化

從 1991 年到 2021 年間的衛星影像集，本研究使用 Landsat 衛星影像來進行處理與比較中的三個波段(綠、近紅外與短波近紅外光波段)，並再對其進行影像處理，轉換成常態化差異水體指數(Normalized Difference Water Index, NDWI (McFeeters, 1996) 影像及改進後常態化差異水體指數(Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI, Xu, 2006) 影像； 公式如下：

NDWI (McFeeters, 1996)：

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1)$$

其中 Green 為綠光波段; NIR 為近紅外光波段

MNDWI (Modified NDWI, Xu, 2006)：

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1} \quad (2)$$

其中 SWIR1 為短波近紅外光波段

對 NDWI 以及 MNDWI 影像進行二值化處理，透過設定閾值的方式(二值化門檻值大多位於 0.2 至 0.3 之間)來將影像分類成水體及其他地貌類別。

(三) 邊緣偵測

針對邊緣偵測步驟為對二值化後的 NDWI 以及 MNDWI 影像進行邊緣偵測，這裡採用的邊緣偵測種類是 Sobel 邊緣偵測，由於 Sobel 邊緣偵測運算簡單，能兼顧運算速度與效果，使用兩個一階微分的卷積算子，偵測灰階值變化強烈區域，即邊緣位置，亦能減少高頻雜訊干擾。利用邊緣偵測描繪出外傘頂洲的輪廓線後，將邊

緣偵測結果輸入進 GIS 中，把這些影像利用 GIS 的工具完成從網格到線條的轉換，最後，對這些線條進行變遷距離的量測，估計移動速率。

(四)驗證

為了驗證本研究的衛星影像處理方法的灘線結果，使用 RTK 定位的實測資料與其進行比對(衛星與車載數據皆轉成 TWD97 坐標，維持一致性)，RTK 定位資料的時間範圍為 2021 年至 2024 年季觀測，測量過程中，操作員駕駛裝備 RTK 系統的沙灘車(採內政部國土測繪中心建置之 e-GNSS 即時動態定位系統)，在海岸零米線範圍內，沿著 S 型路線來回行駛往返正負高程間，以獲取零米線高程之地形斷面(根據空間位置及高程，進行零米高程內插)，以此定位海岸零米線的位置(國家海洋研究院，2024)。RTK 測量的參考站選擇於鰲鼓海堤樁 TAG01，RTK 參考點之觀測平均高程誤差皆在 $\pm 0.5\text{cm}$ 以內，最大誤差為 2.5 毫米，符合 50 毫米內的精度要求。在平面誤差方面，水平坐標變化於 $\pm 2.5\text{cm}$ 之間，垂直坐標變化於 $\pm 1\text{cm}$ 之間，測量最大誤差距離為 5 毫米，符合 20 毫米內的精度要求。基站配置 Trimble R8s GNSS 衛星定位儀，移動站 Mxer150 沙灘車搭配 Trimble Access 的控制器進行即時高速解算(國家海洋研究院，2024)。

(五)長期移動距離及速率估計

將外傘頂洲變遷各時期灘線以 GIS 工具呈現，先分成頂部以及底部兩切線方向(圖1) 量測移動距離，接著以 1991 年為起點，每年一筆資料，時間軸為 x ，以對應的外傘頂洲移動距離為 y ，計算其直線斜率作為移動速率估計。

四、研究結果與討論

(一) 影像處理與邊緣偵測

圖 2 分別為 1991、2001、2010 與 2021 年外傘頂洲變化衛星影像、NDWI 影像圖、MNDWI 影像圖，再透過 Sobel 邊緣偵測後的二值化外傘頂洲變化影像，最後轉成外傘頂洲之線型圖。

圖 3 為 NDWI 與 MNDWI 外傘頂洲二值化影像，由 Sobel 邊緣偵測後得到的外傘頂洲線型，由圖 3 可知，Sobel 邊緣偵測後的二值化 NDWI 的結果相較於 Sobel 邊緣偵測後的二值化 MNDWI 會更為完整，2021 年尤為明顯。主要原因在於最初將衛星影像轉換成 NDWI 及 MNDWI 時，兩者的外傘頂洲輪廓即有差異，以 2021 年為例，MNDWI 將外傘頂洲尾端與水體的交界處大部分判釋為水體，故其結果相較於原本的外傘頂洲衛星影像於尾端處少了一小塊。雖然 NDWI 及 MNDWI 同為檢測水體的指數，但在外傘頂洲植被環境較少的區域，初步發現 NDWI 的偵測效果會比 MNDWI 稍好一點。

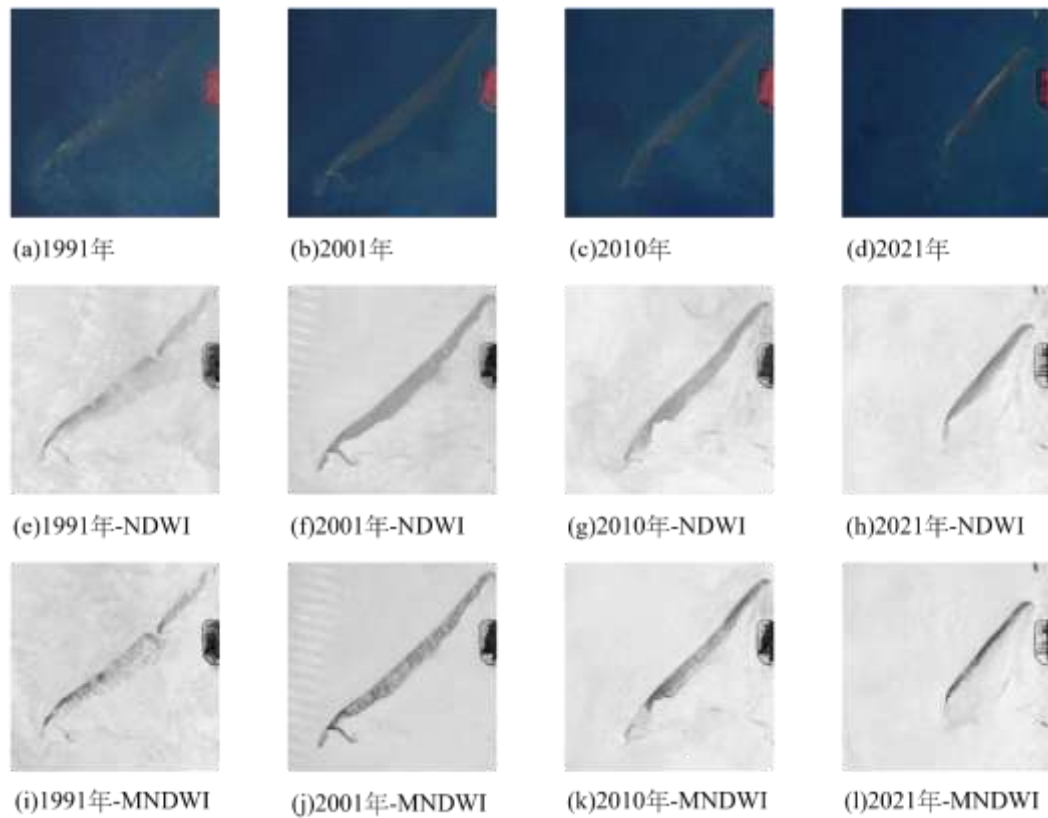


圖 2 1991, 2001, 2010 與 2021 年外傘頂洲變化

(衛星影像圖 a-d、NDWI 影像 e-h、MNDWI 影像 i-l)

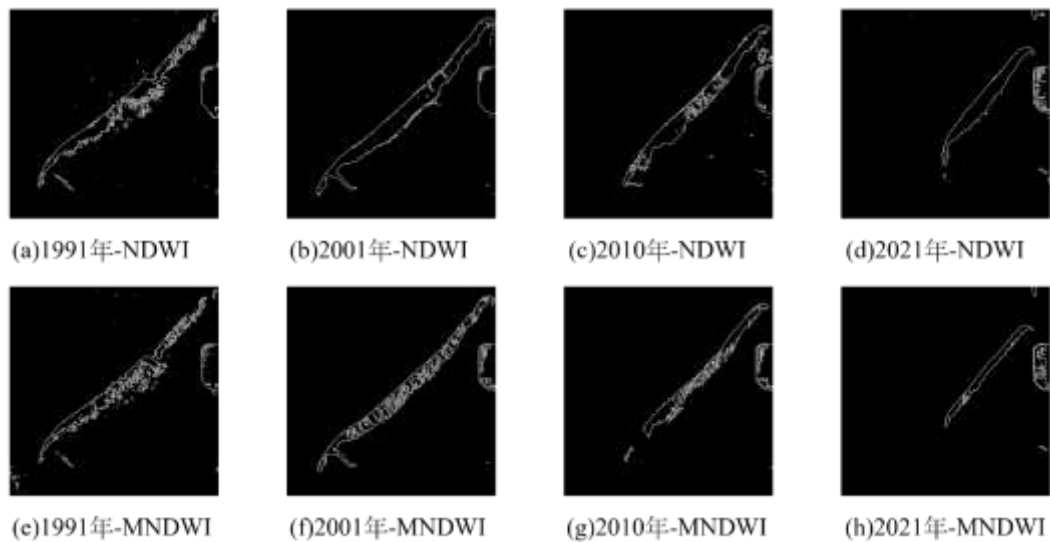


圖 3 1991, 2001, 2010 與 2021 年灘線偵測，分別以二值化 NDWI 外傘頂洲變化影像(a-d)與 MNDWI 外傘頂洲變化影像(e-h)進行 Sobel 邊緣偵測

(二) 灘線變化與移動距離估計

圖 4 為近三十年內外傘頂洲灘線變化圖，除 1992、1997、2002 及 2008 年這四年，因 Sobel 邊緣偵測後的二值化 MNDWI 雜訊相較於二值化 NDWI 少，而採用 MNDWI 外，其餘年份皆採用 NDWI。從圖四來看，可以明顯得知外傘頂洲向東南方向之變遷情況，且外傘頂洲範圍面積有變小的趨勢。針對外傘頂洲變遷的移動距離量測，先分成頂部以及底部兩切線方向(圖 1)，以 1991 年為起點，每時間長度(單位為年)為自變量，以對應的外傘頂洲移動距離(單位為公尺)為應變量，進行資料分析，得到一迴歸直線，斜率結果分別為 89.9 及 150.1 公尺/年，即移動速率(見圖 5)，因此外傘頂洲頂部向西南每年移動約 90 公尺，底部向東每年移動約 150 公尺。由圖發現外傘頂洲移動速率具有週期性變化，本研究目前僅觀察長期趨勢，採全期擬合的方式，建議未來可採分段線性擬合或考量週期效應之擬合，可以得到更完善的擬合結果。

此外，再以每十年為一次時間週期，同樣分成頂部以及底部兩組進行移動距離量測。從 1991 年到 2001 年，外傘頂洲頂部的移動距離約為 798 公尺，底部的移動距離約為 368 公尺；從 2001 年到 2011 年，外傘頂洲頂部的移動距離約為 502 公尺，底部的移動距離約為 885 公尺；從 2011 年到 2021 年，外傘頂洲頂部的移動距離約為 2081 公尺，底部的移動距離約為 2535 公尺。綜合從 1991 年到 2021 年期間，外傘頂洲頂部的整體移動距離約為 3312 公尺；外傘頂洲底部的整體移動距離約為 3708 公尺。

經由本研究分析，結果顯示外傘頂洲北端以及南端的移動相當顯著，這代表外傘頂洲在這三十年間有在明顯的漂移。歸納文獻發現由於為漂沙來源不足，加上冬季期間東北季風引致的沿岸流及長期波流作用，造成外傘頂洲灘線往南後退侵蝕莊等人(2023)，以及鄰近海埔地與離島工業區開發等因素，導致海岸及漂砂失衡現象，致使外傘頂洲受到侵蝕退縮江和蕭(2022)。研究學者也開始探討外傘頂洲變遷對當地養殖環境之衝擊，包括沙洲往內側移動造成水域淤淺，養殖面積逐步縮小，沙洲高度淺化後波浪容易由西側越過沙洲進入東側水域，影響該水域牡蠣產量與質莊等人(2023)。

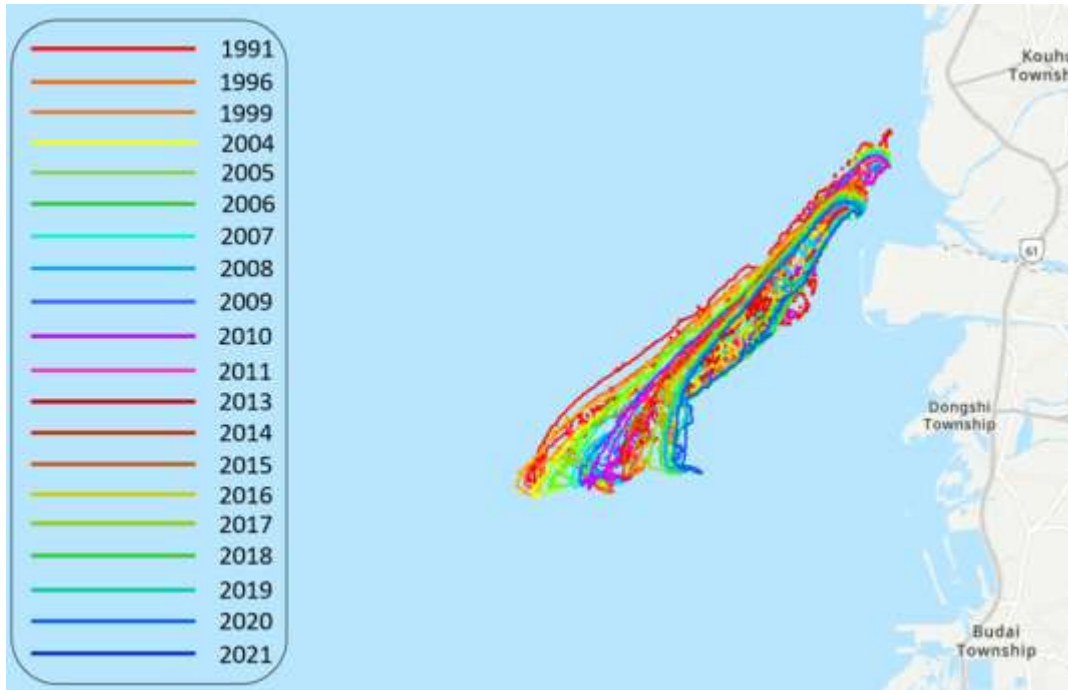


圖 4 1991~2021 期間外傘頂洲灘線變化圖

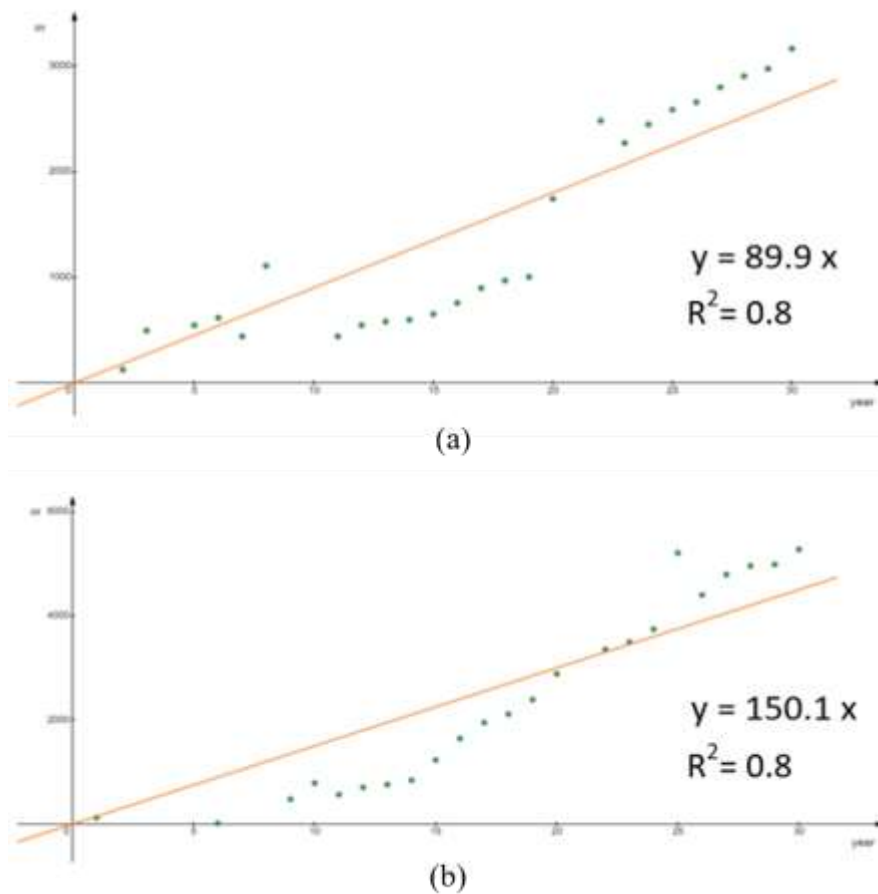


圖 5 外傘頂洲頂部(a)與底部(b) (圖 1 量測方向)之逐年移動距離與移動速率估計 (X 軸時間單位為年，以 1991 年為起點，Y 軸移動距離，單位為公尺)

(三) 車載 RTK 定位資料與衛星影像處理方法的對比驗證

為了驗證衛星影像邊緣偵測的可信度，藉由車載 RTK 定位資料進行比較，圖 6 為車載 RTK 定位資料與衛星影像處理方法的外傘頂洲灘線圖，深藍色為 RTK 定位資料的外傘頂洲灘線，黃色為衛星影像經過處理後得到的外傘頂洲灘線，藉此確認衛星影像處理方法使用了 NDWI 水體指數進行偵測是可行的，由圖 6 顯示 2022/8 及 2023/3 之 RTK 定位資料與對應其時間點的衛星影像處理過後的外傘頂洲灘線圖，可看出衛星影像處理方法的岸線與 RTK 定位資料的灘線大致都吻合，證實使用衛星影像處理得到的岸線與 GPS 車載資料的灘線結果差異不大。

同樣也對 RTK 定位資料與衛星影像處理方法的外傘頂洲灘線頂部及底部進行移動速率的估計，地測移動速率以車載 RTK 定位 2021~2024 季資料共 12 筆去計算，表 1 為外傘頂洲移動速率對照表，由表 1 可得知由衛星影像處理方法得到的外傘頂洲移動速率與 RTK 定位資料得到的頂部移動速率差異約為每年 1m，在與 RTK 定位資料比對後，也幫助了使用衛星影像偵測外傘頂洲之方法確定，證明可利用衛星影像偵測外傘頂洲之變遷，但底部移動速率差異約為每年 3m，相較於頂部，外傘頂洲底部的地形更為平緩，因此導致衛星影像處理與 RTK 定位資料之兩種方法計算出的變遷速率有所差異。根據本研究的觀察，相較於長期移動趨勢(以 2006~2021 為比較基準)，外傘頂洲 2021~2024 底部移動速率較為減緩。

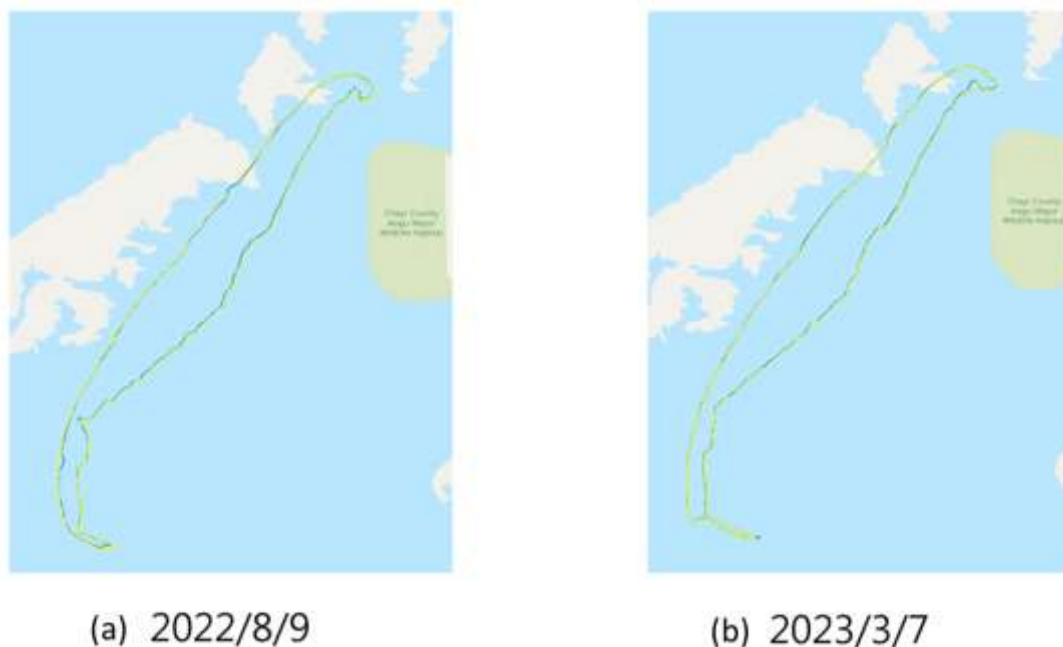


圖 6 2022/8/9 (a)與 2023/3/7 (b)之 RTK 定位資料與衛星影像處理方法的外傘頂洲灘線圖（深藍色為 RTK 定位資料的外傘頂洲灘線，黃色為衛星影像經過處理後得到的外傘頂洲灘線）

表 1 2021~2024 年外傘頂洲移動速率估計之對比驗證

	外傘頂洲頂部 (圖 1 驗證方向)	外傘頂洲底部 (圖 1 驗證方向)
衛星影像偵測結果	87(m/year)	61(m/year)
RTK 定位資料(地真)	86(m/year)	58(m/year)
估算誤差	1(m/year)	3(m/year)

五、結論與建議

本研究結合長期衛星影像大數據及GIS技術，以自動化處理的流程與Sobel邊緣偵測，快速描繪出外傘頂洲的輪廓線後，經由分析外傘頂洲移動距離變化相關數據，提供長時間外傘頂洲變遷資訊，如從1991年到2021年，外傘頂洲北端整體移動距離約為3312公尺，而外傘頂洲南端移動距離約為3708公尺。

針對外傘頂洲變遷的移動速率估計，以年數為自變量(1991年為起點)，以對應的移動距離(單位為公尺)為應變量，進行迴歸分析，藉由長期觀測數據發現外傘頂洲頂部向西南每年移動約90公尺，底部向東每年移動約150公尺。此外，在與RTK定位資料比對後，也幫助了使用衛星影像偵測外傘頂洲之方法確定，證明可利用衛星影像可快速偵測外傘頂洲之長期變遷。從研究中發現外傘頂洲移動變遷已是事實，後續對於自然環境或社會經濟的衝擊，如養蚵業者之影響，值得相關單位加以探討。後續可對外傘頂洲地形變遷進行了深入分析，其中包括自然演替和人工設施引起的變化趨勢，以減緩沙洲侵蝕速率。

未來的研究方向和應用前景可以結合著手於結合人工智慧等方面來進行，將遙測指數方法與機器學習或深度學習技術結合，可提升灘線偵測的自動化程度與分類精度。

致謝

文中論點僅代表作者之立場，如有任何疏漏及謬誤，概由作者負責。作者們由衷感謝內政部、國科會等單位的幫助，與成功大學永續暨人社計畫的經費支持。同時，作者們也感謝編輯團隊與審查者之寶貴建議及協助。

參考文獻

- 江文山、蕭士俊，2022，外傘頂洲侵退防治技術開發與策略建構計畫，雲嘉海岸漂砂質點追蹤與地形變遷機制探討。
- 張智安、楊筑鈞、傅于洳，2018，空間大數據基礎架構平台之簡介，《國土測繪與空間資訊》，第 6 卷，第 2 期，頁 97 - 116。

- 張憲國、賴羿齊、陳蔚瑋，2017，應用衛星影像的水線辨識於外傘頂洲的灘線變遷，
《Journal of Photogrammetry and Remote Sensing》，第 22 卷，第 4 期，頁 243-262。
- 莊曜成、林宏仁、徐立昌、甘芳亘，2023，自然解方於外傘頂洲防護應用，《工程》，
第 96 卷，第 2 期，頁 106-120。
- 陳聿新、朱宏杰，近三十年曾文溪出海口濕地變遷觀測，2024，《濕地學刊》，
第十二卷第一期
- 彭新雅、曾國欣、錢樺、陳彥欽，2019，運用多時期衛星影像探討外傘頂洲變遷，《國
土測繪與空間資訊》，第 7 卷，第 2 期，頁 103-119。
- 蕭國鑫、劉進金、陳大科、徐偉城、何心瑜，2007，多時影像與空載光達資料應用
於地形變遷研究~以外傘頂沙洲為例，《Journal of Photogrammetry and Remote
Sensing》，第 12 卷，第 4 期，頁 419-429。
- 國家海洋研究院，2024，《外傘頂洲地形變遷評估》，國家海洋研究院。
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water
Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery.
Remote sensing of environment, pp.140, 23-35.
- Giza, A., Terefenko, P., Komorowski, T., & Czapliński, P. (2021). Determining long-term
land cover dynamics in the south baltic coastal zone from historical aerial
photographs. Remote Sensing, 13(6), pp.1068.
- Kouhgard, E., Hemati, M., Shakerdargah, E., Shiri, H., & Mahdianpari, M. (2022).
Monitoring shoreline and land use/land cover changes in sandbanks provincial park
using remote Sensing and climate data. Water, 14(22), pp. 3593.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in
the delineation of open water features. International journal of remote sensing, 17(7),
pp. 1425-1432.
- Rogers, M. S., Bithell, M., Brooks, S. M., & Spencer, T. (2021). VEdge_Detector:
automated coastal vegetation edge detection using a convolutional neural network.
International Journal of Remote Sensing, 42(13), pp.4805-4835.
- Xia, J., Luan, G., Zhao, F., Peng, Z., Song, L., Tan, S., & Zhao, Z. (2021). Exploring the
spatial-temporal analysis of coastline changes using place name information on
hainan island, China. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(9), pp.609.
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance
open water features in remotely sensed imagery. International journal of remote
sensing, 27(14), pp.3025-3033.

投稿須知

所有稿件以未曾在國內、外以任何形式刊載為限，且稿件內容不得有侵犯他人著作權或商業宣傳行為，否則由作者自行負法律之責任。文體以中文或英文撰寫為原則，並附中文及英文摘要。稿件須加註標點、分段及編列頁碼。內容編排以下列順序為原則：（一）封面：包括中文及英文之論文名稱、作者姓名、作者所屬單位、聯絡地址、電話、傳真、電子郵件住址；（二）中、英文摘要及關鍵詞等；（三）內文；（四）註釋；（五）謝誌；（六）參考文獻；及（七）附錄與圖表。審查通過後，無法直接由電腦列印之圖、表，應另附完稿之圖、表（不超過A4紙張），以利編排。圖或照片應以黑白為原則，如需彩色印刷請作者自行負擔費用。內文所引用之文獻須列於參考文獻，參考文獻請以姓氏筆劃多寡，依序以中文列出，之後再依英文姓氏之英文字母，依序以英文列出。各項格式書寫方式，請參考下列說明：

各項格式說明如下：

壹、文書檔案採 A4 直式橫寫書格式，版面邊界分別為上（2.54cm）、下（2.54cm）、左（3cm）、右（2.8cm），字體以新細明體及英文 Times New Roman 等兩種字體排版。

貳、首頁（Title page），應包含下列內容：

一、標題（Article Title）：包括中、英文章篇名。

二、作者（Author's Name）：

1. 包括中、英文作者姓名。
2. 分別以中、英文註腳載明作者的職稱、單位。若作者有數人，則以阿拉伯數字 1，2，3…個別標示。
3. 須標示通訊作者(加註*)，註明連繫電話、E-mail，英文電話請以國際電話方式書寫。

三、摘要（Abstract）：包括中、英文摘要。

四、關鍵字（Keywords）：包括中文、英文關鍵字，分別列於中、英文摘要之下。

參、正文（Manuscript）

一、稿件標題章節編號層次及順序

中文請按「一，（一），1，（1），a」順序排列；英文則按「1，1.1，1.1.1…」順序排列。

二、引述用例

（一）直接引述：

中文請用單引號「」；英文請用雙引號“ ”，並以括弧標示引述文獻頁次。

（二）引述中復有引述，或特殊引用時：

中文單引號「」在外，雙引號『』在內。英文雙引號“ ”在外，單引號‘ ’在內。

三、文獻引述用例

(一) 文中註明引述文獻

1. 請以（作者，年份）方式表示。
2. 若有數篇文章以分號（；）區隔；中英文文獻分開，並各自以引述文獻之出版年份先後依序排列。
3. 若同一作者，有數篇文章同時引述，則以（作者，年份 1、年份 2）；若同一作者有同一年發表文章同時引述，則以（年份 a, b）表示。
4. 若一篇文章有 2 位作者，請全部列出。中文為（作者 A 與作者 B，年份）；英文為（作者 A and 作者 B, 年份）
5. 若一篇文章有 3 位以上作者（含 3 位），中文請用（第一位作者等，年份）；英文請（第一位作者 *et al.*, 年份）用。
6. 英文期刊第一作者姓在前，名在後，第二作者之後，名在前，姓在後。

(二) 文中已有作者姓名時

1. 請以作者（年份）方式表示
2. 若有數篇文章同時引述，則以作者 A（年份）、作者 B（年份）…表示
3. 若有必要加註說明時，請用註腳，內文註腳號碼使用上標

四、圖版、插圖及表用例

1. 圖名請置於圖之正下方，並以圖 1、圖 2……方式表示。
2. 表名請置於表格之正上方，並以表 1、表 2……方式表示。
3. 若引用他人圖表需註明資料來源。

五、公式寫法用例

以(1)、(2)、(3)…依序編號。例： $\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P L$ (1)

肆、參考文獻(References)

- 一、專書：作者，年份，《書名》，版次，出版地：出版者。
- 二、期刊論文：作者，年份，篇名，《期刊名》，卷期數，頁碼。
- 三、研討會論文：作者，出版年，論文名稱，《研討會名稱》。
- 四、博碩士論文：作者，年份，《論文名稱》，學校科系名稱(碩/博士論文)。
- 五、網路等電子化資料：作者（單位），年份，篇名，網站名稱，網址。
- 六、技術報告或研究報告：作者，年份，《報告名稱》，研究單位。

中華民國地籍測量學會「國土測繪與空間資訊」期刊 論文審查辦法

中華民國 101 年 09 月 25 日第 16 屆第 6 次理監事聯席會議通過

第一條 為規範「國土測繪與空間資訊」期刊論文審查辦法(以下簡稱本辦法)，得依本會編輯委員會組織簡則第二條規定訂定之。

第二條 來稿經登記後由總編輯就來稿性質，邀請相關專長之編輯委員推薦審查委員。編輯委員會負責對審查委員及投稿作者保持雙向匿名方式審查，審查作業程序如附圖。

第三條 審查委員應於接到論文後三週內審查完畢，並將論文審查表(如附表)，連同論文寄回編輯委員會，審查意見表中須明確勾選其中一項：

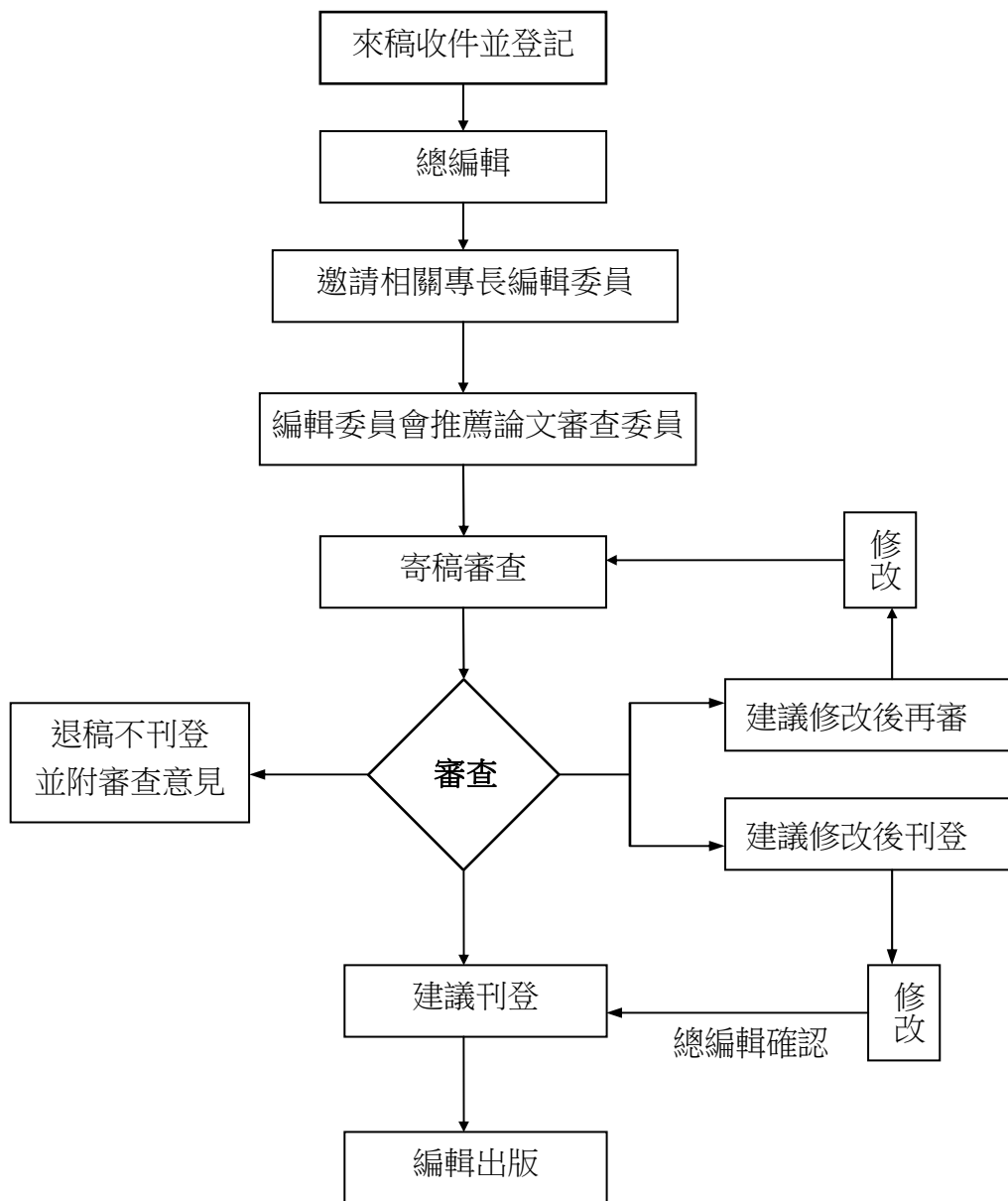
1. 刊登。
2. 修改後刊登(應列明審查意見及建議事項)。
3. 修改後再審(應列明審查意見及建議事項)。
4. 不適刊登(應列明審查意見)。

第四條 審查結果處理方式：

處理 方式 第一位 審查委員意見 第二位 審查委員意見	刊登	修改後刊登	修改後再審	不適刊登
刊登	刊登	寄回修改	寄回修改後再審	第三位審查
修改後刊登	寄回修改	寄回修改	寄回修改後再審	第三位審查
修改後再審	寄回修改後再審	寄回修改後再審	寄回修改後再審	不適刊登
不適刊登	第三位審查	第三位審查	不適刊登	不適刊登

附註：再審以一次為限。

第五條 本辦法經理監事會通過後實施，修改時亦同。



論文審查流程圖

國土測繪與空間資訊期刊

TAIWAN JOURNAL OF GEOINFORMATICS

編輯委員會

主任委員 陳國華 國立臺北大學不動產與城鄉環境學系

編輯委員 (依姓氏筆劃順序排列)

史天元 國立陽明交通大學土木工程學系

林士淵 國立政治大學地政學系

張智安 國立陽明交通大學土木工程學系

陳惠玲 前台中市政府地政局副局長

曾子榜 國立成功大學測量及空間資訊學系

曾國欣 國立中央大學太空及遙測研究中心

景國恩 國立成功大學測量及空間資訊學系

蕭宇伸 國立中興大學水土保持學系

儲豐宥 國立政治大學地政學系

韓仁毓 國立臺灣大學土木工程學系

總 編 輯 周天穎 逢甲大學土地管理學系

編 輯 葉美伶 逢甲大學地理資訊系統研究中心

洪翎嘉 內政部國土測繪中心

周廷柔 逢甲大學地理資訊系統研究中心

發 行 人 楊 名 理事長 國立成功大學測量及空間資訊學系

鄭彩堂 主 任 內政部國土測繪中心

出 版 所 中華民國地籍測量學會

內政部國土測繪中心

國土測繪與空間資訊

TAIWAN JOURNAL OF GEOINFORMATICS

第十三卷第二期

民國一十四年七月

Vol. 13, No. 2

July 2025

目 錄

CONTENTS

手機內建 GNSS 運用 RTK 技術於建物傾斜監測之可行性研究

林修國、高偉翔、張晏維 131

Feasibility Study on the Application of Smartphone-Embedded GNSS with RTK Technology for Building Tilt Monitoring

Shiou-Gwo Lin, Wei-Hsiang Kao, Yen-Wei Chang

多元量測技術應用於桃園大圳及地籍測量圖資結合之研究

黃立信、薛世勸 155

A Study on the Integration of Taoyuan Canal and Cadastral Surveying Map Information by Multiple Measurement Techniques

Lih-Shinn Hwang, Shi-Mai Xue

以支援向量迴歸在水稻田產量高解析度光譜影像研究

萬綯、李哲源、鄭育欣 179

A Support Vector Regression Approach on the Estimation of Paddy Rice of Image Classification

Shiuan Wan , Che-yuan Li, Yu-Hsin Cheng

從戰地轉型到觀光：金門土地利用變遷對碳儲存空間分布之影響

張曜麟、黃幹忠、吳政庭 191

From Military Zone to Tourism Hub: The Impact of Land Use Change on Carbon Storage Spatial Patterns in Kinmen Island

Yao-Lin Chang, Kan-Chung Huang, Cheng-Ting Wu

以衛星大數據觀察長期國土變遷-以外傘頂洲為例

陳聿新、朱宏杰、盧韋勳 215

Observing Long-term Territorial Changes Through Spatial Big Data: A Case Study of Waisanding Sand Bar

Yu-Xin Chen, Hone-Jay Chu, Wei-Shiun Lu