

國立政治大學地政學系
私立中國地政研究所 碩士論文

ICESat-2 於台灣本島地形高程
之特性分析

Characteristic Analysis of ICESat-2 Land Elevation
in Taiwan

研究 生：林美佑

指 導 教 授：林士淵

中 華 民 國 一 百 一 十 年 七 月



謝誌

回首初踏入政大時的懵懂，當時的我對於研究所的一切感到興奮與好奇，雖然過程中也經歷了好一段漫長的探索，自我的懷疑，以及信心的各種潰擊，然而在這兩年的洗禮後也默默的有所成長，並終於將這本論文完成。這兩年參雜著許多回憶、淚水與歡樂，這些都刻在我心裡，並變成繼續推進我向前的動力。

在這當中，首先要感謝我的指導教授，士淵老師，老師在研究上提供我各種幫助，願意讓我嘗試多種方向，並訓練我遇事的邏輯思考能力，特別謝謝老師在這兩年來的照顧；同時，要感謝我的口委：金聰老師與玉菁老師，謝謝老師對於論文提供諸多建議，使我的研究更為完整；另外，也感謝測量組的各位老師，在就學期間給予的幫助與提攜，使我能夠順利的在政大畢業。

此外，身旁一群一同努力的夥伴也是支撐我完成學業的一大動力，維傑、凱文、歆瑋與馬慧，謝謝你們在研究路上的陪伴，一起進行各種實質上以及名義上的學術研討會，或是各種零食的補充，時不時召開下午茶會議，帶給我各種歡笑以及勉勵，在我灰心時也不時為我注入心靈雞湯，若沒有你們的陪伴，這條路可能走得更為艱辛，恭喜大家一起撐過那些痛苦的日子了。另外，謝謝研究室的學長姊弟妹們，尤其感謝學長姐們的各種幫助，讓我知道研究室處處有溫暖。

最後，想感謝我的家人，讓我能無後顧之憂的完成碩士學位，成為我背後最大的支柱，希望未來的我也能繼續成為你們的驕傲；謝謝男友給予的鼓勵與自信，陪伴我走過人生最後一次的學生身分，並邁入人生的下個階段；此外，要謝謝當初選擇唸研究所的自己，即使知道自己的不足，也願意讓自己面對挑戰並加以學習的那個你，願日後的你也能抱持這份初心面對日後人生的各種挑戰。

細數各個夜晚在離開綜院後拖著疲憊的身軀，痠痛的眼睛，無力再思索的大腦，經過那藍色的操場，身旁或有幾個同伴，或是隻身一人，嘴上可能時常抱怨甚是碎唸在政大發生的種種，如今卻也十分想念。

林美佑 在政大地政的那些日子
民國 110 年 7 月

摘要

數值地形模型(Digital Elevation Model, DEM)為表達自然地形高程資訊的地理資料，應用層面相當廣泛，產製方式如水準測量、衛星定位系統、航空攝影測量、光達測量，然其皆須前往現地量測並僅適用於中小範圍之測量，對於縣市級、國家級甚至全球性之大範圍測量較不具效益。反之，衛星測高技術則適用於此種大範圍高程測量，其利用衛星搭載儀器對地球高程進行量測，提供多時序、大範圍之高程資訊。

2018 年由 NASA 所發射之 ICESat-2 即雷射測高衛星，目標提供近年之全球性高程資料(ATL08)，可作為除了 SRTM、ASTER GDEM、AW3D30 等現有之全球性 DEM 之外的大範圍高程產品，有希望於未來作為台灣大範圍高程資料的另一選擇，因而評估其高程於台灣之精度與特性有其必要性。

本研究分析 ICESat-2 ATL08 地形高程於台灣本島之精度表現，並針對土地覆蓋類別、坡度及海拔高度此三種影響因子分析其高程特性，另以 DEM 慣於管理及查找之鄉鎮市區單元及基本地形圖比例尺五千分之一圖框為單元，進一步以不同空間單元進行高程分析，最後針對不同影響因子分析其對於 ICESat-2 ATL08 地形高程之影響趨勢。

研究成果指出高程誤差隨土地覆蓋由無植被變為完全植被覆蓋而增加；坡度與高程誤差具正向關係，誤差增加幅度隨坡度之增加由高增加幅度遞減為低增加幅度，而後又增為高增加幅度，整體誤差趨勢線呈持續上升之現象；海拔高度與高程誤差同具正向關係，然誤差增加幅度隨海拔高度之增加而遞減，且高程誤差趨勢可依趨勢轉折處分為趨勢陡峭與趨勢平緩，各項成果將有助於 ICESat-2 高程資料日後應用於台灣作為參考。

關鍵詞：ICESat-2、ATL08、衛星測高技術、高程誤差特性

Abstract

ICESat-2, a laser altimetry satellite launched by NASA in 2018, aims to provide global elevation data (ATL08) in recent years. In addition to the existing global DEMs, it can be considered as another option for users in Taiwan. To understand the performance of this product, the accuracy of the elevation derived from ICESat-2 ATL08 was firstly evaluated. Then the factors influencing elevation accuracy, including land cover type, slope and altitude, were analyzed based on different spatial units.

Compared with the official DEM provided by the Ministry of Interior, the RMSE of elevation error ranges from 2.598 m to 13.009 m. After inspecting the influencing factors, it was indicated that the elevation error increases as the land cover changes from no vegetation to full vegetation coverage. Overall, elevation error increases with slope and elevation. The results are expected to be helpful for the applications of ICESat-2 elevation data in Taiwan as a reference.

Keyword : ICESat-2, ATL08, Satellite Altimetry, Characteristics of Difference of Elevation

目錄

謝誌.....	I
摘要.....	II
Abstract	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VII
表目錄.....	IX
第一章 緒論.....	1
第一節 研究背景與動機.....	1
第二節 研究目的	4
第三節 研究架構.....	5
第二章 文獻回顧.....	7
第一節 衛星測高技術.....	7
一、衛星測高技術及其原理	7
二、雷達測高與雷射測高	9
三、小結	11
第二節 ICESat 及 ICESat-2 介紹	13
一、ICESat (The Ice, Clouds, and Land Elevation Satellite)	13
二、ICESat-2(The Ice, Clouds, and Land Elevation Satellite-2)	15
三、ICESat、ICESat-2 差異比較	17
四、小結	22

第三節 ICESat-2 高程產品及原理.....	23
一、ICESat-2 產品	23
二、ATL08 地面高程原理	24
三、ATL08 相關研究	33
第四節 高程精度驗證方法	35
第三章 研究方法	39
第一節 研究區域	39
第二節 研究資料與處理工具	40
第三節 研究流程與理論基礎	43
一、資料前處理	45
二、影響因子萃取	46
三、地形高程誤差評估	49
四、趨勢分析	49
第四章 研究成果	51
第一節 ICESat-2 地形高程特性分析.....	51
一、地形高程精度	51
二、土地覆蓋類別	52
三、坡度	56
四、海拔高度	60
第二節 鄉鎮市區單元特性分析	63
一、誤差與各因子分布狀況.....	63
二、誤差趨勢分析	67
第三節 比例尺五千分之一圖框單元特性分析	71
一、誤差與各因子分布狀況.....	71

二、誤差趨勢分析	76
第四節 ICESat-2 地形高程特性統整	82
第五章 結論與建議	85
第一節 結論	85
第二節 建議	87
參考文獻	88



圖目錄

圖 1 衛星測高示意圖	3
圖 2 ICESat-2 示意圖	3
圖 3 衛星測高技術基本概念圖	8
圖 4 衛星測高 footprint 示意圖	9
圖 5 不同光達系統植被偵測示意圖	10
圖 6 ICESat GLAS 示意圖	14
圖 7 ICESat 運行時程圖	15
圖 8 ICESat-2 光束配置圖	16
圖 9 ICESat 與 ICESat-2 footprint 及採樣間隔比較圖	18
圖 10 ICESat 單光束與 ICESat-2 多光束配置差異圖	19
圖 11 ICESat-2 產品階級圖	24
圖 12 ATL08 高程產品產製流程圖	25
圖 13 光子離散程度分類示意圖	29
圖 14 點散函數示意圖	30
圖 15 光子標記示意圖	32
圖 16 研究區域	39
圖 17 OpenAltimetry 網站示意圖	41
圖 18 研究流程圖	44
圖 19 高程轉換示意圖	45
圖 20 ICESat-2 高程誤差分布圖	52
圖 21 ICESat-2 高程點土地覆蓋分佈圖	53
圖 22 ICESat-2 土地覆蓋類別之高程誤差分布圖	54
圖 23 ICESat-2 土地覆蓋類別之高程誤差敘述統計圖	56
圖 24 ICESat-2 坡度與高程誤差散布圖	57
圖 25 ICESat-2 高程點坡度分佈圖	58
圖 26 ICESat-2 坡度之高程誤差敘述統計圖	59
圖 27 ICESat-2 坡度之高程誤差增加幅度圖	59
圖 28 ICESat-2 海拔高度與高程誤差散布圖	60
圖 29 ICESat-2 高程點海拔高度分佈圖	61
圖 30 ICESat-2 海拔高度之高程誤差敘述統計圖	62
圖 31 ICESat-2 海拔高度之高程誤差增加幅度圖	62
圖 32 鄉鎮市區單元之高程點數量、高程誤差分布圖	64
圖 33 鄉鎮市區單元之影響因子分布圖	65
圖 34 鄉鎮市區單元之高程誤差與平均坡度散布圖	66
圖 35 鄉鎮市區單元之高程誤差與平均海拔高度散布圖	67
圖 36 鄉鎮市區單元之偏離值箱形圖、偏離值空間分布圖	68

圖 37 鄉鎮市區單元之高程誤差與平均坡度散布圖(標註偏離值)	69
圖 38 鄉鎮市區單元之高程誤差與平均海拔高度散布圖(標註偏離值)	69
圖 39 鄉鎮市區單元之高程誤差與平均坡度趨勢圖	70
圖 40 鄉鎮市區單元之高程誤差與平均海拔高度趨勢圖	70
圖 41 圖框單元之高程點數量分布圖(全)	72
圖 42 圖框單元之高程點數量、高程誤差分布圖	72
圖 43 圖框單元之影響因子分布圖	74
圖 44 圖框單元之高程誤差與平均坡度散布圖	75
圖 45 圖框單元之高程誤差與平均海拔高度散布圖	75
圖 46 圖框單元之偏離值箱形圖、偏離值空間分布圖	77
圖 47 圖框單元之高程誤差與平均坡度散布圖(標註偏離值)	77
圖 48 圖框單元之高程誤差與平均海拔高度散布圖(標註偏離值)	78
圖 49 圖框單元之高程誤差與平均坡度趨勢圖	80
圖 50 圖框單元之高程誤差與平均坡度趨勢散布圖(依土地覆蓋類別劃分)	80
圖 51 圖框單元之高程誤差與平均海拔高度趨勢圖	81
圖 52 圖框單元之高程誤差與平均海拔高度趨勢散布圖(依土地覆蓋類別劃分)	81

表目錄

表 1 各衛星測高任務資訊	12
表 2 ICESat 與 ICESat-2 總體差異比較	21
表 3 GDEM 高程精度評估之統整	37
表 4 ICESat-2 ATL08 使用資料表	42
表 5 土地覆蓋資料表	47
表 6 混淆矩陣示意表	48
表 7 GLCS-LC100、GlobeLand30 精度評估	53
表 8 ICESat-2 土地覆蓋類別之高程誤差敘述統計表	55
表 9 ICESat-2 坡度之高程誤差敘述統計表	58
表 10 ICESat-2 海拔高度之高程誤差敘述統計表	61
表 11 林地之高程誤差敘述統計表(依坡度劃分)	84
表 12 林地之高程誤差敘述統計表(依海拔高度劃分)	84





第一章 緒論

第一節 研究背景與動機

數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)為表達自然地形高程資訊的地理資料，舉凡土木工程、水文分析、災害防救(蕭國鑫等人，2010；卓芫陞，2015)等領域皆可應用，應用層面相當廣泛。在現今測量技術日益發達的世代裡，已有諸多方式可產製 DEM 等地形高程產品，如使用水準測量獲取地形高程資訊，或使用衛星定位系統(Satellite Positioning System, GPS)接收衛星訊號而獲得高程值，亦可使用航空攝影測量技術，經由無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)拍攝之航照影像建置數值地形模型，光達(Light Detection and Ranging, LiDAR)亦為建置高程資料常用之方式。

上述方法各有其優缺點及適用性，水準測量之高程精度為最佳者，然其測站間須達到平面的通視，且耗時耗力，較不經濟，為地面測量常見之缺點；以 GPS 測量高程可提供公分等級之精度，相較於水準測量其具備施測快速與降低經濟成本等優點(陳國華，2004)，但對於沒有佈設 GPS 追蹤站的地方，則需自行架設(Xiao & He, 2013)，如此則仍須耗費人力成本；航照影像獲取高程資訊之優點為具備歷史性，經由過往所拍攝之影像可產製當時之高程地形，並同時具備即時性與機動性，可於交通不便之區域進行量測，且其獲取之範圍相對前述兩種方式大許多(吳仲民，2008；黃煜婷，2013)，然使用 UAV 仍須前往現場拍攝，且僅適用於天候良好時飛行(王國隆等人，2019)；光達為新興之遙測技術，相較於其他施測方式，其所需時間與精度皆較佳(蕭震洋等人，2009)，但同樣需於現場進行施測，且無法提供連續的觀測資料(邱宜珊，2020)。

前述方法各有優缺點，然而皆須至現地施測，且適用之範圍較適用於中小區域的測量，若針對縣市級甚至國家級的研究範圍，則上述方法較不具效益，因而，針對大範圍的高程測量應找尋其他適用之測量方式。

近年來遙測技術發展快速，利用衛星搭載儀器對地球高程進行量測之技術亦日益發達，應用上也逐漸普及，該技術稱為衛星測高技術(Satellite Altimetry)，其可提供多時序的高程資料，且短時間內便可掃描大範圍面積(Seeber, 2003)，適用於全球尺度下之測量，自其發展以來，已有許多測高衛星獲取的資料可免費下載，使其成為適用於大範圍高程測量的方法。

美國太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)發射之 ICESat-2(The Ice, Clouds, and Land Elevation Satellite-2)即為衛星測高技術中的雷射測高衛星，主要用於冰凍圈之高程量測，同時也對地球地形高程進行採樣，於技術及設計上皆有別於過往之測高衛星。ICESat-2 目標於運行兩年內於中緯度地區產製密集軌道(Markus et al., 2017)，並以產製之 ATL08 高程產品提供近年之全球性高程資料，並於未來產製全球網格高程資料(ATL18)，如 SRTM、ASTER GDEM、ALOS WORLD 3D 30 m (AW3D30) 等具代表性之全球數值地形模型(Global Digital Elevation Model, GDEM)。

以台灣而言，目前可免費取得之大範圍高程資料包含 SRTM、ASTER GDEM、AW3D30 等等 GDEM，然而前述三種 GDEM 所使用之基礎資料分別為 2000、2000-2009、2006-2011 年所採集，其已為數十年前之資料所產製，高程資訊較久遠；除了上述 GDEM 之外，僅有內政部產製之 DEM 可供台灣大範圍高程使用，因此，台灣於大範圍高程資料上的選擇較少，而 ICESat-2 提供之近年全球性高程資料有望於未來作為台灣大範圍高程資料的另一選擇，故評估其高程於台灣的精度與特性有其必要性。本研究以內政部公告之 DEM 作為參考資料，並參照過往評估 GDEM 高程之方式，針

對 ICESat-2 ATL08 於台灣本島之高程進行評估，用以提供台灣關於 ICESat-2 地形高程之相關資訊作為參考。

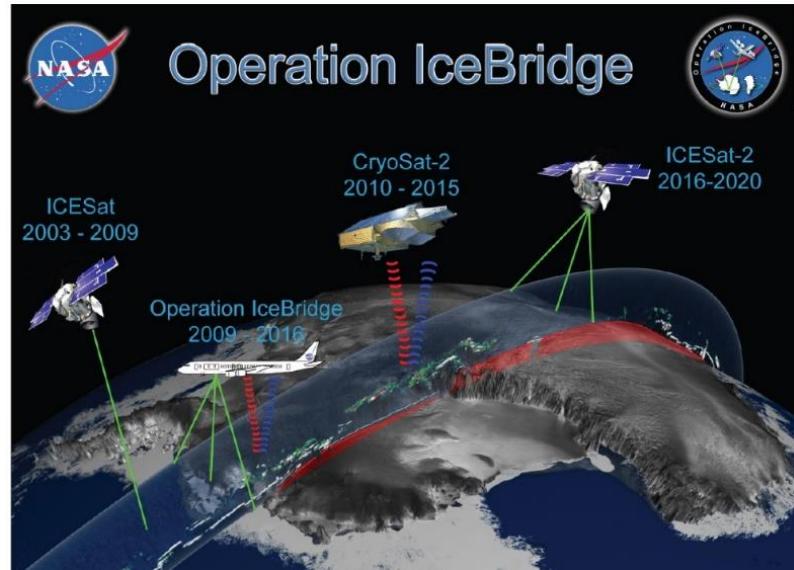


圖 1 衛星測高示意圖 (Insights, <https://reurl.cc/83Gbr4>)



圖 2 ICESat-2 示意圖 (NASA's Goddard Space Flight Center,

<https://www.nasa.gov/goddard>)

第二節 研究目的

本研究使用雷射衛星測高系統 ICESat-2 ATL08 地形高程資料進行研究，分析其高程資料於台灣本島之高程精度與特性，並分別以三種影響高程特性之因子進行本研究區域之高程特性分析，包含土地覆蓋類別、坡度及海拔高度此三種影響因子，亦將研究區域以不同之空間單元分析 ICESat-2 ATL08 地形高程資料之特性。本研究欲達成階段性目標如下：

一、評估 ICESat-2 ATL08 地形高程於台灣本島之精度表現。

二、了解 ICESat-2 ATL08 地形高程與土地覆蓋類別、坡度及海拔高度影響因子間之關係。

第三節 研究架構

本論文共分為五個章節，各章內容簡述如下：

第一章 緒論

本章介紹本研究之研究背景與動機，並提出本文之研究目的與架構。

第二章 文獻回顧

本章第一節對衛星測高技術之原理及現有之測高衛星進行回顧；第二節回顧 ICESat-2 及其前身 ICESat 任務，並系統性歸納整理兩者之差異；第三節對 ICESat-2 產品及地形高程原理進行介紹，並回顧前人使用其地形高程之相關研究；第四節回顧過往評估 GDEM 之方式。

第三章 研究方法與流程

本章介紹本研究之方法，首先說明研究區域、資料及處理工具，而後介紹研究流程之內容，並詳細說明研究方法之理論基礎。

第四章 研究成果與分析

本章評估 ICESat-2 地形高程之精度表現，並依不同空間單元分析其於土地覆蓋、坡度及海拔高度下之特性，最後綜整其於台灣本島之特性。

第五章 結論與建議

本章針對研究成果綜整結論，並提出未來進行相關研究之建議。



第二章 文獻回顧

本研究使用 ICESat-2 雷射測高衛星之地形高程資料進行研究，故於本章第一節回顧衛星測高技術；第二節針對 ICESat-2 及其相似之前一任務 ICESat 分別回顧，並綜整分析兩者之差異；第三節說明 ICESat-2 地形高程之萃取及產製原理，並回顧 ICESat-2 地形高程相關研究；第四節回顧過往 GDEM 精度驗證之方法。

第一節 衛星測高技術

衛星測高技術始源於 1960 年代，由 1969 年 Williamstown Symposium 研討會提出使用衛星進行高程測量的構想(Kaula, 1969; 鐘郁翔，2010)，起初作為海洋表面地形之主動觀測技術，而後用於海洋學研究及大地測量等面向(McGoogan, 1975)。

一、衛星測高技術及其原理

衛星測高技術為測量衛星與地球表面間垂直距離的一種測距技術，基本原理是將測高儀(Altimeter)搭載於衛星上，當衛星環繞地球運轉時，沿垂線方向對地球表面發射脈衝訊號，使脈衝訊號傳遞至目標物，再經由目標物反射該脈衝訊號回傳測高儀(Jarihani et al., 2013; 吳繹如，2014)，如圖 3 所示。

脈衝訊號經由模擬感測器及採樣器處理後，會將反射之能量轉化為數值化之紀錄，此數值化紀錄即稱為波形(Waveform)，經由波形資料可確認發射脈衝及接收回波之時間，並以此計算出脈衝飛行之時間(Time of Flight, TOF) (Schutz et al., 2005)，即脈衝訊號輸出與接收之間的傳播時間差 Δt ，將其與傳遞速度光速 c 計算，便可經由式 1 有效的量測衛星與目標物之間的

距離 a_0 。同時，經由衛星雷射測距(Satellite Laser Range, SLR)、GPS、DORIS 等定位技術進行衛星精密定位(覃美芳，2014)，或利用精密軌道定位計算衛星軌道，則可獲得測高衛星於該時間點之空間位置與橢球高 h ，藉由式 2 即可計算海水面與參考橢球面之距離 M ，此即為最初衛星測高技術應用於海面之基本原理(Seeber, 2003)。於實際應用時距離 a_0 與 M 會受到不同因素的影響而存在誤差，主要四大誤差包含軌道誤差、測高儀誤差、訊號傳遞延遲造成之誤差以及地球物理改正誤差(黃紀云，2015)，因此，實際應用時仍須經由各項改正而得正確距離。

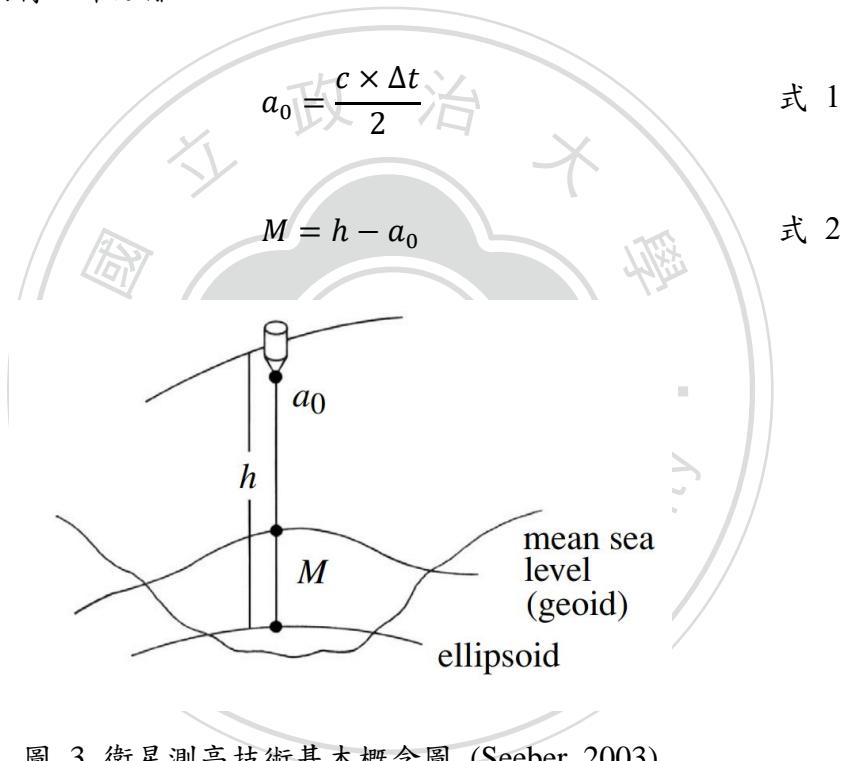


圖 3 衛星測高技術基本概念圖 (Seeber, 2003)

此外，測高儀發射脈衝訊號時，脈衝會有發散之現象，使照射於地面時會產生數公分至數公里直徑大小的圓形範圍，此範圍即稱為 footprint，如圖 4 所示，因此，測高儀所量測出之測量值為落於 footprint 裡的表面高程。不同裝置之 footprint 大小會因其儀器、飛行航高等原因而不同(Rinne, 2011; 林莉萍等人，2013)，而 footprint 的大小則會限制其空間解析度(McGoogan, 1975)。

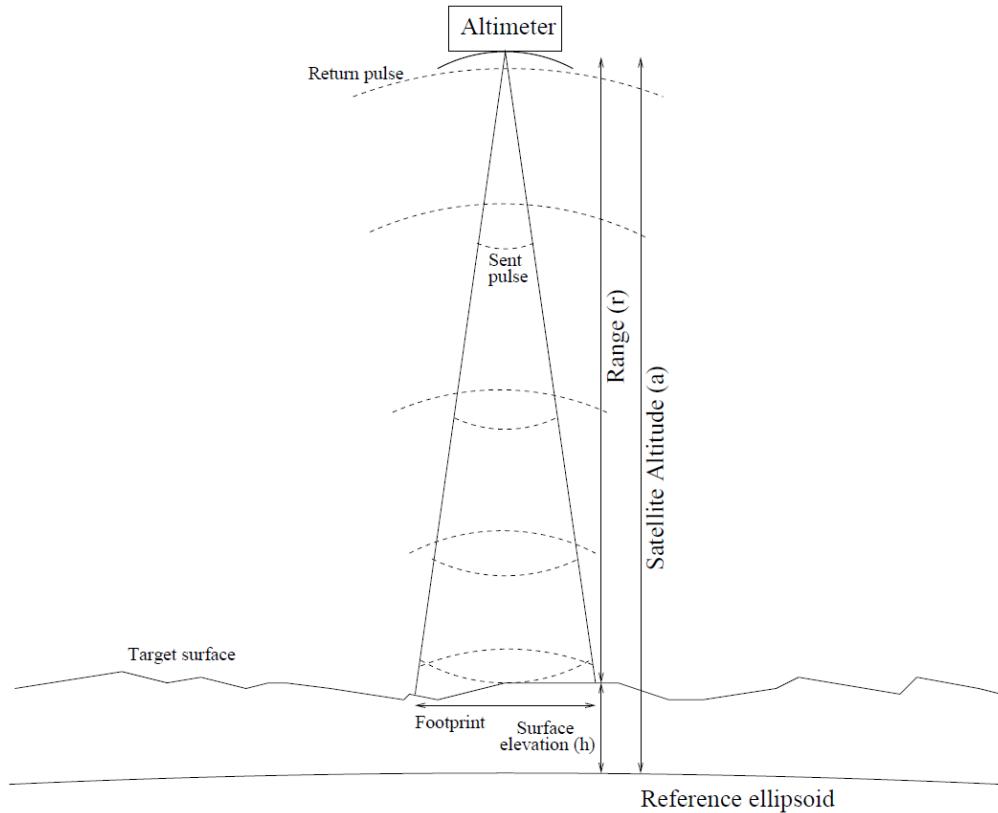


圖 4 衛星測高 footprint 示意圖 (Rinne, 2011)

二、雷達測高與雷射測高

衛星測高技術可進一步依據測高儀使用之脈衝頻率而分為雷達測高 (Radar altimetry, RA) 與雷射測高 (Laser altimetry, LA) (吳繹如, 2014)。使用無線電頻率信號者為 RA，波長界於 1 釐米至 100 公里之間；使用光學波長者為 LA，或稱為光達 (Rinne, 2011; Falkner & Schulz, 2015)。

RA 與 LA 相比，RA 運行的任務時程相對較長，可提供長時序的資訊，且 RA 所使用之無線電頻率信號可穿透雲層，因而其不受雲層遮蔽影響 (Rinne, 2011)，然而，其 footprint 相對較大 (約數公里至數十公里)，故容易受地形坡度引起的誤差而影響，可能造成數公尺至數十公尺之誤差，因而對於地面高程精度相對較差，但其仍可以適當的高程精度滿足較低解析度之製圖需求 (Brenner et al., 2007; Wang et al., 2011)。相對 RA 而言，由於能

量的消耗，LA 的任務時程通常較短，且無法穿透較厚的雲層因而受雲層遮蔽影響量測，然而，其具有較小的 footprint(約數公分至數十公尺)，故地形坡度而引起之誤差並不會對 LA 造成很大的影響，故可提高其高程精度並滿足更細緻的製圖需求(Wang et al., 2011; Martin, 2014)。

使用雷射脈衝的 LA，即為搭載於衛星上的光達系統(Falkner & Schulz, 2015)，而光達資料依感測紀錄方式可分為全波形(Full waveform)、脈衝式(Discrete-return)及光子計數(Photon-counting)方式，如圖 5 所示。以感測植被為例，全波形感測器記錄植被反射能量的完整時間剖面，脈衝式系統則記錄反射能量超過閾值時的時間，而光子計數系統可記錄雷射發射後垂直分布裡單一光子反射能量的時間(Neuenschwander et al., 2019)。然而，使用前兩種光達資料進行大範圍的量測較不具效用，因其需以低運行高度、高能量脈衝方式進行量測，故限制其空間覆蓋範圍並使採樣成本較高；而光子計數光達系統的特性為高運行高度、發射脈衝所需之能量較低、高重複頻率且使用高靈敏度的檢測器，藉由這些特性使其能夠有較大的空間覆蓋範圍(Zhou, 2017; Popescu et al., 2018)。現有的兩個 LA 衛星中，ICESat 使用全波形形式紀錄資料，而其接續任務 ICESat-2 則採用光子計數形式，因而相較於 ICESat 更為精進。

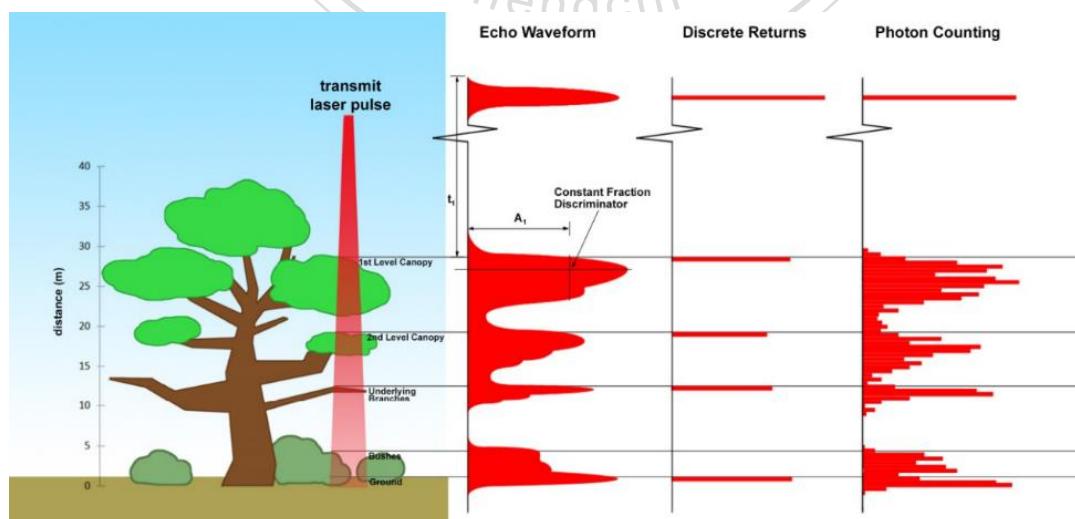


圖 5 不同光達系統植被偵測示意圖 (Neuenschwander & Magruder, 2016)

三、小結

自 NASA 於 1973 年發射第一顆搭載測高儀的衛星，SKYLAB，且針對海面高度獲取精度 1 公尺的量測成果後(Gopalapillai et al., 1975)，直至今日，已有許多不同的衛星測高任務，分別以不同的軌道配置、採樣特性、傳感器及量測原理來觀測地球(Dettmering et al., 2019; Wang et al., 2011)，而地球上不同地表覆蓋類型所反射之波形形狀、大小皆不同，藉由不同的反射波形可辨別地表覆蓋特徵，如海洋、陸地、冰川及植被等等(Jarihani et al., 2013)，例如 NASA 與法國國家太空研究中心(National Centre for Space Studies, CNES)共同發展之 Jason 系列雷達測高衛星，主要任務為觀測全球海平面高度；歐洲太空總署(European Space Agency, ESA)發射之 Cryosat-2 雷達測高衛星，主要任務為極區監測，用於監測全球暖化影響下之冰層及浮冰變化(<http://www.altimetry.info/>)；NASA 發射之首顆雷射測高衛星 ICESat，用於量測覆蓋南極洲和格陵蘭島的大型冰層表面高度，而 ICESat-2 雷射測高衛星則為監測地球高程變化(<https://www.nasa.gov/>)。直至今日已有諸多測高衛星可供不同目的之使用，表 1 詳列過去至現今的各項測高衛星任務資訊。

經由本章節之回顧，可知衛星測高技術適用於量測衛星及目標物間之距離，並可應用於各面向之高程應用，且已有多項衛星任務使用該技術進行地球高程測量。於衛星測高技術中，本研究所使用之 ICESat-2 屬於地形高程精度較佳之 LA 衛星，同為 LA 衛星者亦有其前身任務 ICESat，因而，本研究於下節針對現有之兩個 LA 衛星 ICESat 與 ICESat-2 進行相關回顧。

表 1 各衛星測高任務資訊

Satellite	Agency	Mission duration (year)	Altitude (km)	Inclination (°)	Frequency	RA/ LA
Skylab	NASA	1973-1974	435	50	Ku	RA
GEOS 3	NASA	1975-1979	845	115	Ku	RA
SeaSat	NASA	1978-1978	800	108	Ku	RA
Geosat	US Navy	1985-1990	800	108	Ku	RA
ERS-1	ESA	1991-2000	785	98.5	X	RA
Topex/ Poseidon	NASA/CNES	1992-2005	1336	66	Ku	RA
ERS-2	ESA	1995-2011	785	98.5	Ku	RA
GFO	US Navy/NOAA	1998-2008	800	108	Ku	RA
Jason-1	CNES/NASA	2001-2013	1336	66	Ku, C	RA
Envisat	ESA	2002-2012	800	98.5	Ku, S	RA
ICESat	NASA	2003-2009	600	94	532, 1064 nm	LA
Jason-2	CNES/NASA/ Eumetsat/NOAA	2008-2019	1336	66	Ku, C	RA
CryoSat-2	ESA	2010-now	720	92	Ku	RA
HY-2	China	2011-now	971	99.3	Ku, C	RA
SARAL	ISRO/CNES	2013-now	800	98.55	Ka	RA
Jason-3	CNES/NASA/ Eumetsat/NOAA	2016-now	1336	66	Ku, C	RA
Sentinel-3A	ESA	2016-now	815	98.6	Ku, C	RA
Sentinel-3B	ESA	2018-now	815	98.6	Ku, C	RA
ICESat-2	NASA	2018-now	500	92	532 nm	LA

第二節 ICESat 及 ICESat-2 介紹

上節回顧衛星測高技術，本節將針對現有之兩個雷射測高衛星 ICESat 與 ICESat-2 分別進行回顧，介紹其任務目的、測量原理及其用於測高的各項設計，並針對兩者之差異進行比較，回顧其差異之設計原理。

一、ICESat (The Ice, Clouds, and Land Elevation Satellite)

ICESat 測高衛星由 NASA 於 2003 年 1 月 13 日發射，其主要任務係藉由監測南極及格陵蘭之冰層高程變化來確定極地冰層體積的長期及每年間的變化，用以評估冰層對於全球海平面的影響(Zwally et al., 2002; Wang et al., 2011)。

ICESat 搭載之主要儀器為地科雷射測高系統(Geoscience Laser Altimeter System)，又稱 GLAS，是由 NASA 戈達德太空飛行中心(Goddard Space Flight Center, GSFC) 所打造及測驗之系統(Schutz et al., 2005)，其內安裝三個雷射裝置用於對目標物發射雷射脈衝，分別為 Laser 1、Laser 2 及 Laser 3，並以 40 Hz 的頻率對地發射雷射脈衝。在其運行過程中，一次啟用一個雷射裝置進行量測，而為了達到更精確之大氣測量效果，配有 1064 nm 的主光束用於增強雷射光於雪地之反射並量測地形高度，以及 532 nm 之雷射脈衝則用於量測大氣氣溶膠(Zwally et al., 2002; Abdalati et al., 2010)，而 ICESat 之 footprint 大小約為 70 公尺，連續的 footprint 在沿軌道方向上每隔約 172 公尺會有一 footprint 存在於地球表面上(Schutz et al., 2005)。

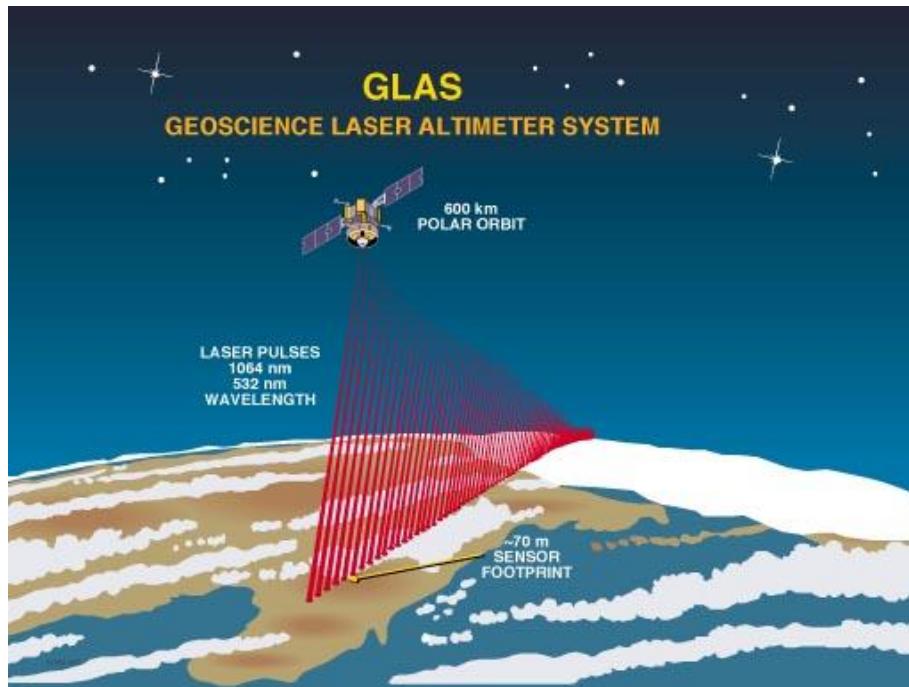


圖 6 ICESat GLAS 示意圖 (ICESat/GLAS website,

<https://www.csr.utexas.edu/glas/>)

其測量概念是利用 GLAS 發射雷射脈衝，脈衝在傳遞過程中經過雲與氣溶膠的相互作用後傳達地面，而後經由地面反射回大氣中，再次與雲與氣溶膠相互作用後，最終由 GLAS 上之望遠鏡接收該反射之脈衝(Wang et al., 2011)，雷射脈衝轉化為波形紀錄後，可確認發射脈衝及接收回波之時間並計算 TOF，由 TOF 及光速可計算出與目標物之距離，但此距離仍須經由相關校正才得以計算出地面高程 (Schutz et al., 2005)。

ICESat 任務運行時程圖如圖 7，圖中 Laser 1 為紅色圖框、Laser 2 紫色圖框及 Laser 3 藍色圖框，其搭載之三個雷射裝置，設計時預期每一雷射裝置可連續運行約 18 個月，用以實現約五年的任務，然而，因設備製造之問題使 Laser 1 在運行約 37 天後便發生異常並故障，因而在 2003 年秋季啟用 Laser 2 並將 ICESat 由連續測量模式轉變為靜態測量模式(campaign mode)，使其沿著地面重複軌道在北半球秋、冬及春季時進行每年三次 33 天的高程

測量；Laser 2 於 2005 年因能量快速流失而停止運作(Abdalati et al., 2010)並啟動 Laser 3；2007 年時，為了延長任務的壽命而使一年僅剩兩季之運作，且 Laser 3 於執行 14 天後的 L3k 運作期時終止運作，並切換回低能量之 Laser 2 繼續任務，最終於 2009 年 10 月 11 日停止發射雷射脈衝(Wang et al., 2011, Martin, 2014)，總共執行 19 組運作期。

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2003			L1							L2a		
2004			L2b			L2c				L3a		
2005			L3b			L3c				L3d		
2006			L3e			L3f				L3g		
2007			L3h						L3i			
2008			L3j						L3k		L2d	
2009			L2e						L2f			

圖 7 ICESat 運行時程圖 (Wang et al., 2011)

二、ICESat-2(The Ice, Clouds, and Land Elevation Satellite-2)

ICESat-2 為 ICESat 任務的接續任務，並由 NASA 於 2018 年 9 月 15 日發射升空，主要之任務為評估冰層特徵的變化、量測海冰乾舷(Freeboard)及冰層高度，雖然其主要任務為監測冰凍圈之變化，但其也收集地球陸地表面的資料用以提供多種陸地應用並確定全球植被高度(Markus et al., 2017; Neuenschwander & Pitts, 2019)。

ICESat-2 所搭載之儀器為 Advanced Topographic Laser Altimeter System，又稱 ATLAS，使用低脈衝能量、波長為 532nm 的綠雷射光，並以 10kHz 的脈衝重複頻率向地球表面發射雷射脈衝，其在地表上產生直徑約 17 公尺的 footprint，並在沿軌道方向上每 0.7 公尺產生一 footprint，因而使兩次射擊

之間有大量的重疊 (Magruder & Brunt, 2018)。此外，ATLAS 總共產生六條光束，且依能量強弱可分為強光束與弱光束，能量強度比為 1:4，分別用於偵測低反射率及高反射率之地表(Palm et al., 2018)，一強光束與一弱光束合稱為一對光束對，共形成三對光束對向地表進行資料的採集，三組光束對彼此間相距地面距離約 3.3 公里，每光束對之強弱光束彼此相距 90 公尺 (Markus et al., 2017)，光束配置可見圖 8。

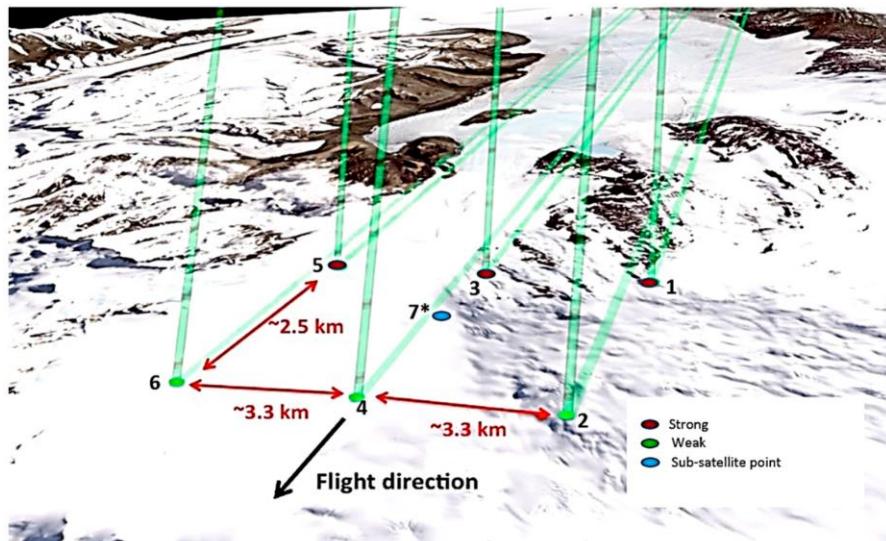


圖 8 ICESat-2 光束配置圖 (Neuenschwander & Magruder, 2019)

相較於一般商用之光達系統，ATLAS 使用雷射測距中較新的技術，即光子計數技術(Photon Counting Technology)，與一般光達系統差別在於光子計數技術是以單光子等級來偵測雷射反射光，因而可提高儀器偵測靈敏度，當偵測靈敏度提升時，便可提高雷射脈衝重複頻率，從而改善空間覆蓋範圍；然而，因單光子等級之偵測，故使資料量相對龐大，且光子計數技術對於太陽背景雜訊較為敏感，使其容易受到太陽背景雜訊之影響，因而造成信號與雜訊分離困難的問題，故 ICESat-2 任務中用來區分信號光子及雜訊光子的演算法是由該任務重新設計(Neuenschwander & Magruder, 2019)。

在運行週期方面，ICESat-2 之重複軌道週期為 91 天，每 91 天會通過同一軌道，用以確定季節性之高度變化，而此設計使其在地面上形成 1387 條軌道，又稱參考地面軌道(Reference Ground Track, RGT)，RGT 在越高緯度的地區會因軌道間越來越近而變得密集(Seidleck et al., 2018)，然而軌道間在熱帶緯度地區會有較大的空隙，因此在中低緯度地區 ICESat-2 將系統性的執行 Operational off-nadir pointing，以略為偏離天底方向 RGT 最大 1.8 度之方式進行測量，以提高資料的分布並密集描繪樹冠及地面高度資料以做優化(Neuenschwander et al., 2019)，但在極區地區，ICESat-2 仍使用重複軌道測量模式，針對極區進行季節性重複測量(Markus et al., 2017)。

三、ICESat、ICESat-2 差異比較

由前述針對 ICESat 及 ICESat-2 進行各別基本介紹之回顧可以瞭解各別任務之目的、搭載的儀器、測量原理及運行週期等，接下來將針對兩任務之間的差異進行分析，並回顧兩者差異的原因。

在任務目的方面，ICESat 及 ICESat-2 主要目的皆是針對極區環境進行地形高程的量測，ICESat 任務中除了極區環境的量測中，也成功展現其對於非極區環境的貢獻，使其資料應用遠超出初始設計目的，如森林冠層高度、雲層高度、氣溶膠高度分布及土地高度變化等(Wang et al., 2011)，也因 ICESat 證實其具有此能力，而使 National Research Council 要求進行 ICESat 的接續任務，並將 ICESat-2 主要的科學目標明確訂定為針對冰層變化、海冰厚度、植被生物量進行量測(Abdalati et al., 2010)，且因 ICESat 任務中的經驗及失敗過程使 ICESat-2 得以獲得改進。

在測量技術方面，雖然兩任務皆為利用雷射光計算脈衝發射與接收的時間差以計算距離的雷射測距方式進行量測，但 ICESat 與 ICESat-2 採用不同之感測紀錄方式，ICESat 的資料為全波形感測方式，而 ICESat-2 採用光

子計數技術，因此，ICESat-2 之測量靈敏度及脈衝重複頻率皆較 ICESat 更高，使其沿軌道上兩兩 footprint 的間隔距離由 ICESat 之 172 公尺縮短為 0.7 公尺，與 ICESat 相比可增加其空間覆蓋範圍，而資料量也更為豐富。

此外，相比之下 ICESat 屬於 footprint 直徑較大的系統，將會限制地形及樹冠高度的推導(Neuenschwander & Magruder, 2019)，且在地形起伏較大的地區將難以將植被光子與地形光子做區隔(Lefsky et al., 2007)，而 Neuenschwander & Pitts(2019)指出 ICESat-2 的 footprint 大小由 ICESat 直徑約 70 公尺縮減為 17 公尺，且其在沿軌道方向上每 0.7 公尺連續地進行量測，使其即使在地形起伏較大的區域仍提供足夠的資料來區隔地表及植被高度，兩者之 footprint 及採樣間隔差異比較如圖 9 所示。

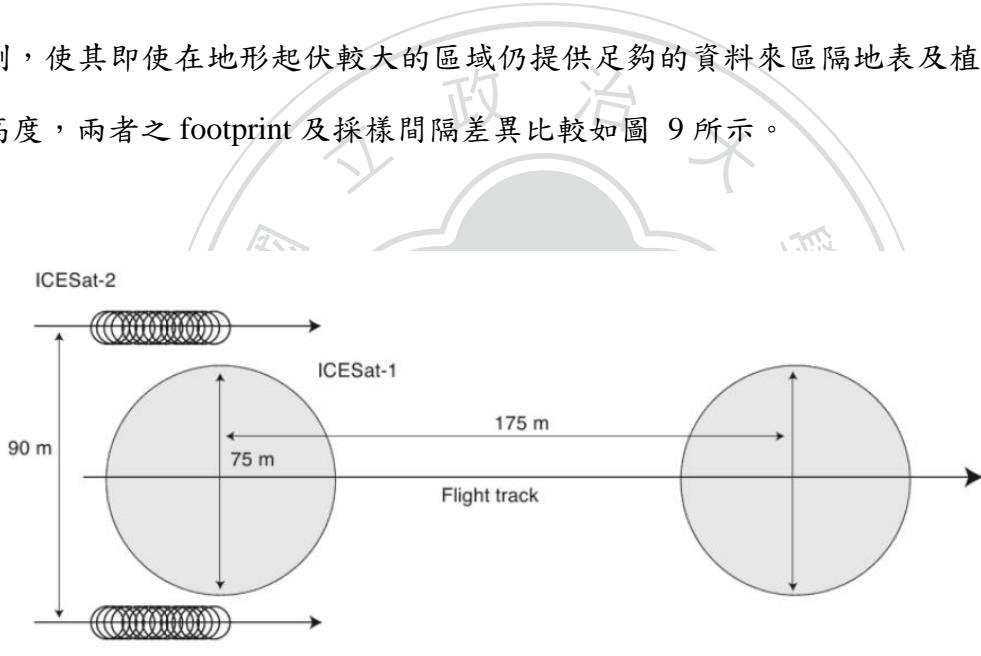


圖 9 ICESat 與 ICESat-2 footprint 及採樣間隔比較圖 (Martin, 2014)

ICESat 所搭載的 GLAS 向地表發射單一光束進行量測，然而，因雷射光束的指向控制有其限制性，使雷射光束的發射無法完全與 RGT 吻合，故衛星此次與下次通過時的雷射光束位置並不完全一致(圖 10)，使得難以分辨冰層是否隨著時間的變化而流失，又或者是因雷射光束些微的偏離 RGT 而指向較低的山坡造成，因此 ICESat 必須藉由多次經過同一地區才能先確定該地坡度，接著估算冰層的流失。為避免 ICESat-2 遭遇與 ICESat 相同之

問題，ICESat-2 進而使用多光束進行量測，故每次衛星經過 RGT 時，在 RGT 的左側及右側皆會有一條光束，因此，由單次衛星通過即可計算光束對之間的坡度，並可藉由內插而獲得參考地面軌跡的高程(Markus et al., 2017)。

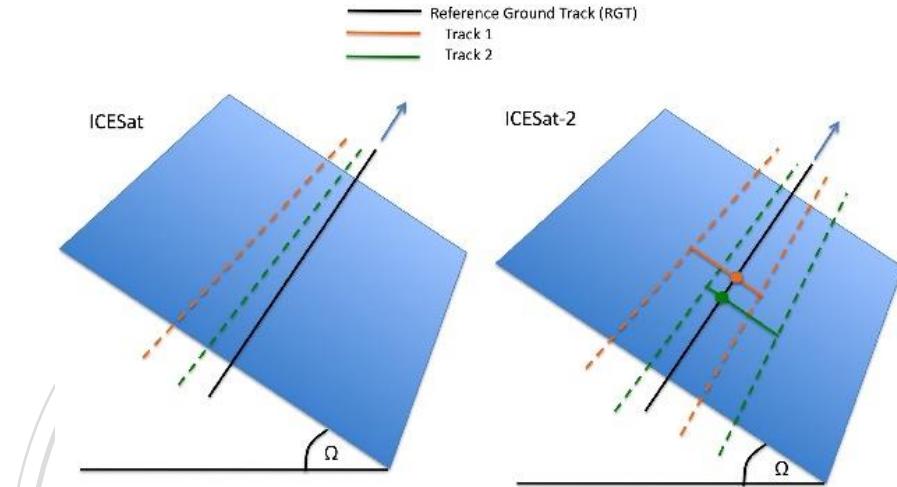


圖 10 ICESat 單光束與 ICESat-2 多光束配置差異圖 (Markus et al., 2017)

在空間覆蓋範圍方面，ICESat -2 因下列原因，使其大幅提升空間覆蓋範圍，實際覆蓋範圍將比 ICESat 增加九倍(Neuenschwander & Pitts, 2019; Neumann et al., 2019; Markus et al., 2017)：

- (一) 藉由多光束測量，對於南北緯 60 度間的中緯度地區可提供密集的空間採樣；且雷射脈衝重複頻率的提升，使沿軌道上 footprint 間隔距離大幅縮短。
- (二) 為了改善中緯度的縱向空間採樣，ICESat-2 在中緯度地區並不會保持重複地面軌道的方式測量，而以 Operational off-nadir pointing 加強收集中低緯度陸地及海洋資料。
- (三) 相較於 ICESat 於任務中後期由連續測量模式改為的靜態測量模式， ICESat-2 採用連續測量模式。

綜合上述，ICESat-2 習取 ICESat 之各種狀況及問題，使其在各方面作出相應的改進，並在儀器設計、光束配置、空間覆蓋範圍等面向皆更加精進，綜整前述分析並詳列兩者各面向之差異於下表 2：



表 2 ICESat 與 ICESat-2 總體差異比較

Mission	ICESat	ICESat-2
Operational	2003~2009	2018~present
Altimeter	GLAS	ATLAS
Laser	1064 nm (infrared light),	532 nm (green light)
Wavelength	532 nm	
Laser Technique	Waveform	Photon counting
Laser Pulse Repetition Rate	Slower (40Hz)	Faster (10kHz)
Footprint Diameter	~70m	17m
Along-track Intervals	~172m	0.7m
Laser Beam	Single	Multiple (3 beams)
Cross-track Intervals	-	Each pair 90 m Each beam 3.3 km
Orbit Inclination and Coverage	94°; coverage up to $\pm 86^\circ$	92°; coverage up to $\pm 88^\circ$
Nominal Altitude	600 km	500 km
Repetition Period	91-day exact repeat orbit with a 33-day sub-cycle	91-day exact repeat orbit with monthly sub-cycle for the polar regions and oceans
Operation Mode	Continuous operation to campaign mode	Continuous operation
Coverage Improve	-	Operational off-nadir pointing over land areas improve coverage for terrestrial and vegetation.
Pioneering Work	The first polar-orbiting spaceborne laser altimeter system.	The first to realize photon counting laser altimeter concept on a spaceborne platform.

四、小結

經由前述 ICESat 及 ICESat-2 之介紹，可知兩任務於全球尺度下提供各種高程資訊，且 ICESat 成功收集多種高程應用資料，使有接續任務 ICESat-2 的出現，然而，兩任務所提供之資料仍有許多差異之處。

ICESat 光束配置僅有單一光束且採樣間隔距離較遠，運行過程中任務運作模式的轉換，使其非持續連續對地球採集高程資料，故在空間覆蓋範圍及提供之資料量上較不如 ICESat-2；相反地，ICESat-2 為多光束配置，以六條光束進行採集，採樣間隔短及持續採用連續測量模式，皆使 ICESat-2 在資料量及提供資料之範圍有所提升。此外，中緯度地區的指向策略也使其更適用於中緯度地區的研究，以位於中緯度的台灣為例，ICESat 通過台灣之軌道較為稀疏，且本身採樣的特性使得資料量並不多，因此 ICESat-2 更適用於提供台灣地形高程資料。

第三節 ICESat-2 高程產品及原理

本節回顧 ICESat-2 產製之高程產品，首先介紹其提供的高程產品，並選取適用於本研究之產品；而後回顧該產品的高程計算原理；最後回顧前人對於該產品之相關研究。

一、ICESat-2 產品

ICESat-2 主要任務為針對冰凍圈之偵測，故其資料可產製冰凍圈相關應用產品，如海冰乾舷、海冰及冰層高程等等。此外，其於全球範圍下進行高程資料的採集，故可用於產製其他非冰凍圈應用之產品，如地表、樹冠及海洋高程等。ICESat-2 收集之資料透過不同程度的處理後，共可產製 18 種產品，分別用於不同面向之應用，依不同的處理程度可將其產品分為四種等級，如圖 11 所示：

- (一) Level-0：原始遙測資料。
- (二) Level-1：ATL01、ATL02，經科學單位轉換後之產品。
- (三) Level-2：ATL03、ATL04。ATL03 記錄每一光子之經緯度及高程資料，ATL04 為大氣剖面之標準化相對背向散射資料。
- (四) Level-3A：陸冰、海冰、大氣、植被、土地、海洋及內陸水等特定表面之高程資料集，其高程基礎資料為紀錄光子位置之 ATL03。
- (五) Level-3B：Level-3A 各特定表面高程網格化後之產品。

由於 ICESat-2 產製數種產品，各產品適用之面向皆不同，本研究欲針對地形高程進行特性分析，適用於地形高程的產品為 ATL03、ATL08 及 ATL18，然 ATL03 光子等級之資料於本研究範圍而言資料量過於龐大，資料使用及分析上不易，而 ATL18 尚未產製完成，故選擇以 ATL08 為本研究資料。

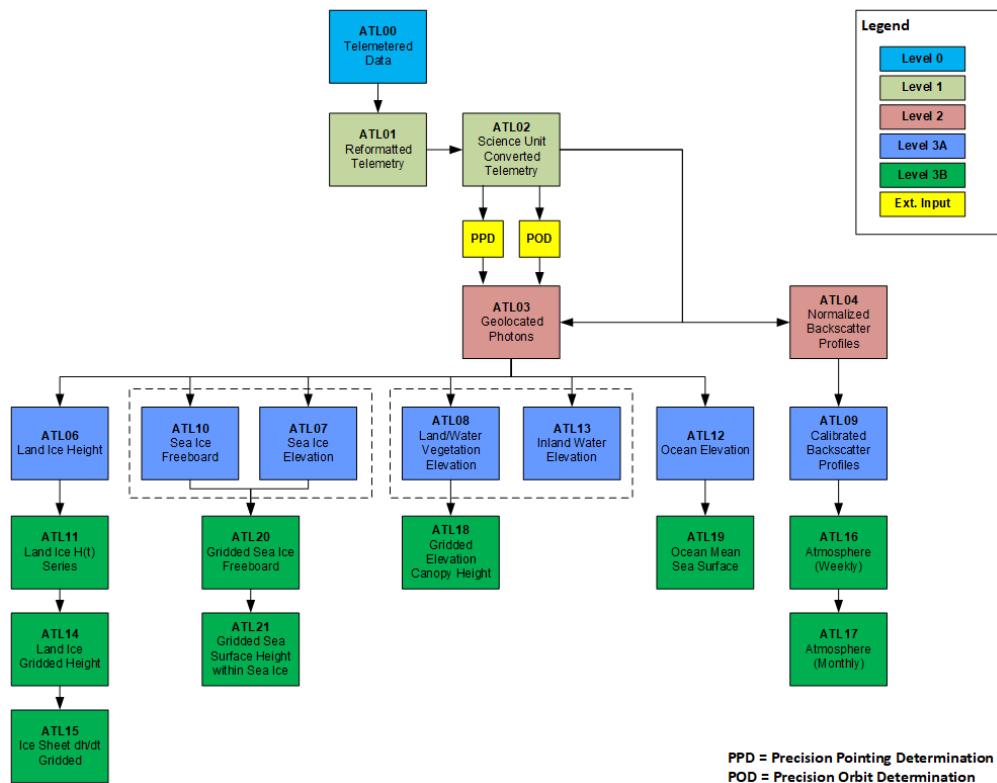


圖 11 ICESat-2 產品階級圖 (NSIDC, <https://nsidc.org/data/icesat-2/products>)

二、ATL08 地面高程原理

本研究使用 ATL08 產品，因此針對其地形高程之計算原理進行回顧，包含 ATL08 所使用之演算法及各項參數計算原理，原理內容參考自 ATL08 Algorithm Theoretical Basis Document(ATBD)(Neuenschwander et al., 2019)。

由於光子計數技術對於太陽背景雜訊較為敏感，故其通常較一般常見商用系統感測器含有更多雜訊(Neuenschwander & Pitts, 2019)，由數量龐大的光子中萃取地表及樹冠，首要需進行雜訊的濾除，而後將光子進行地表、樹冠、表層樹冠(Top of Canopy, TOC)分類，最終可得相關地形高程資訊，以下將各步驟分別介紹，並將各步驟以圖 12 表示：

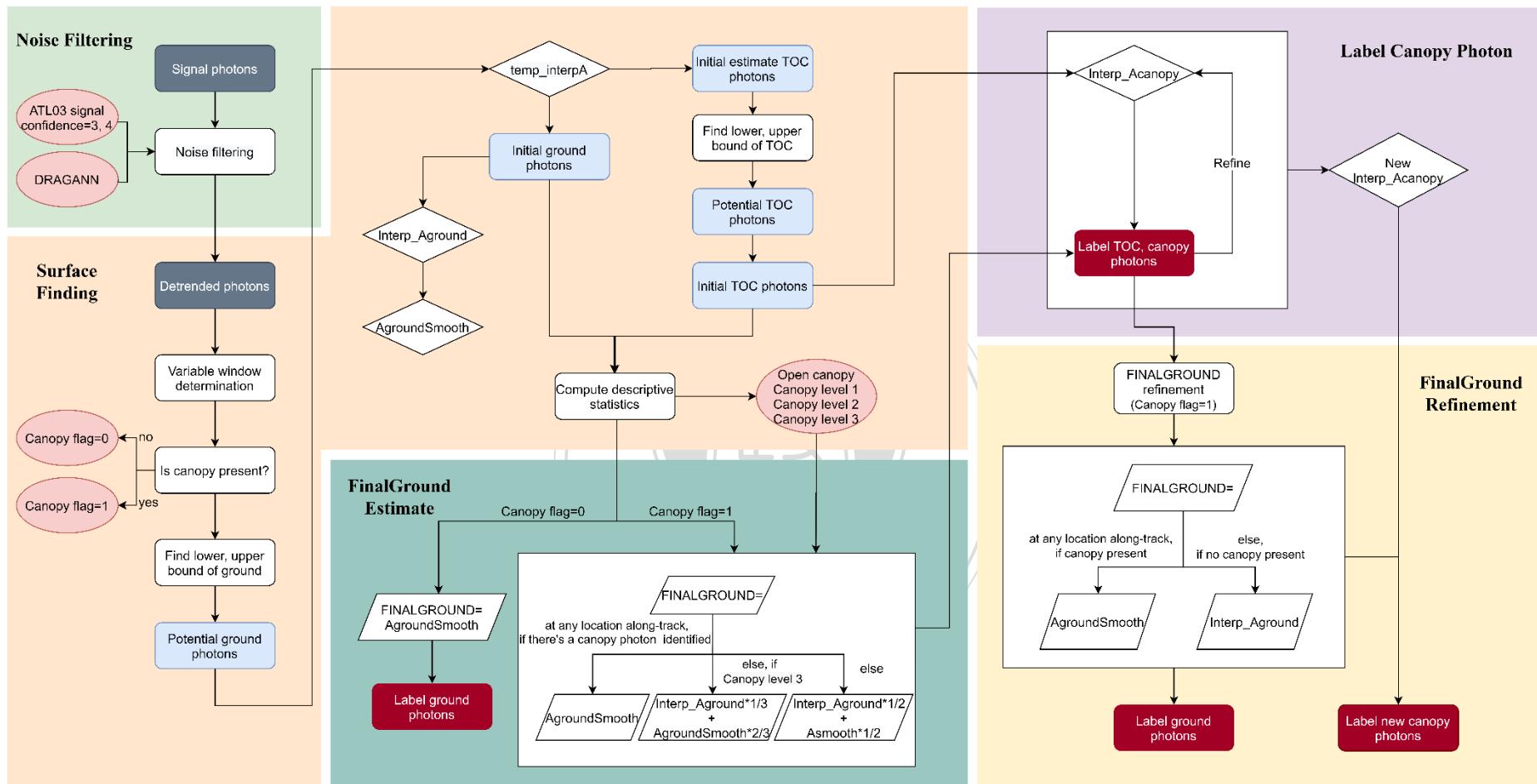


圖 12 ATL08 高程產品產製流程圖

(一) 雜訊濾除

為將信號光子(Signal Photons)與雜訊分離，ATL08 所採用雜訊濾除的方式結合以下兩種方式：

1. ATL03 標記為中高等級信號可信度的光子：ATL03 除了紀錄偵測到之光子的經緯度及橢球高之外，同時會將收集到的光子初步分類、標記為信號光子或雜訊，並依信號光子被分類為信號的可信度分為低中高三級(signal confidence flags=2, 3, 4)。
2. NASA 提出之 DRAGANN(Differential, Regressive, and Gaussian Adaptive Nearest Neighbor)過濾技術(Xing et al., 2020)：利用信號光子在空間上會比隨機出現的雜訊更密集的基本概念進行光子的過濾。

ATL03 用於信號查找的方式在地形表面較簡單的地區有良好的效果，如冰層，然而其在植被覆蓋的區域容易有錯誤判斷之問題，因此 ATL08 結合 DRAGANN 過濾方式，確保所有潛在的信號光子都列入後續計算(Neuenschwander & Pitts, 2019)。

(二) 初始表面查找

將信號光子與雜訊分離後，分離出的信號光子則用於後續萃取地表及樹冠。ATL08 表面演算法中的標準處理範圍大小為 10 公里，又稱為區塊長度(Neuenschwander & Pitts, 2019)。以下將 ATL08 表面演算法分為數項步驟介紹：

1. 信號光子去趨勢化(De-trending)

對於萃取出的信號光子(輸入資料)需先去除地形效應，用以增進演算法的成效。使用由輸入資料得出的高度平滑近似表面(ASmooth)將信號光子去趨勢化，而此得出的去趨勢後的高度將

用於後續表面查找。近似表面 ASmooth 效用同低通濾波器，而對於輸入資料的平滑量多寡則取決於地形起伏，當地形起伏較高時，平滑遮罩的大小將降低以避免地形過度過濾。

2. 確定樹冠是否存在

地表上是否存在樹冠是影響能否良好預估地表的重要因素，因樹冠的存在會使地面反射的光子減少，當地面光子數量稀少時便較難進行地表的估計，而在每一處理區塊中判斷是否有樹冠存在將利用 Landsat Vegetation Continuous Fields (VCF)來比較，VCF 提供 30 公尺網格中植被高度高於 5 公尺的比例 (Neuenschwander & Pitts, 2019)，若處理區塊的平均樹冠覆蓋比例高於 5%，則該處理區塊視為存在樹冠，並將 Canopy Flag 參數標記為 0，反之，無樹冠存在者 Canopy Flag 標記為 1。

3. 計算濾波視窗大小

表面查找的計算中使用 Variable Windowing Span(Moving Window)計算統計數值並過濾和平滑資料。在沿軌道方向上的不同處理區塊之滑動窗口大小會依該處理區塊的總光子數量而不同，但窗口大小在處理區塊中為固定，計算公式如式 3，其中 a 為形狀參數， $length$ 為該處理區塊的總光子數量。

$$Sspan = ceil[5 + 46 * (1 - e^{-a*length})] \quad \text{式 3}$$

$$a = \frac{\log(1 - \frac{21}{51 - 5})}{-28114} \approx 21 * 10^{-6} \quad \text{式 4}$$

4. 初始地面查找

初始地面查找所使用的輸入資料為高程去趨勢化後的光子資料，並假設輸入的所有信號光子為地面，藉由過濾及平滑的

方式切除高度較低的多餘光子，以便找出潛在地面光子之下界線，而找尋上界線之方法同下界線，以上下界線之間的光子為潛在地面光子。將潛在地面光子經過過濾及平滑處理移除可能的樹冠光子後，留下的潛在地面光子經由線性內插產製一估計地表(temp_interpA)，並以此表面上下一定範圍內之光子標記為初始地面光子，而初始地面光子經由內插產製一插值地表(Interp_Aground)，並將其過濾及平滑後產製 AgroundSmooth，此兩地表為用於後續產出最終地表所使用的中階地表。

5. 初始表面樹冠 TOC 查找

找尋初始 TOC 的方法與找尋地表的方法相似，與地面查找之方法差別在於輸入資料的光子高程值需先經由乘上負一的變號處理，並加上平均高度值，而最終被保留的光子即為初始 TOC 光子(Neuenschwander & Pitts, 2019)。

6. 敘述統計計算

為便於瞭解資料狀況，利用前述計算之滑動窗口計算窗口內各項高程敘述統計資料，包含窗口內所有光子的高程最大值、最小值、平均數、中位數、標準差(SD)，以及初始 TOC 光子的高程中位數、標準差與初始地面光子之高程標準差。此外，地表估計高度之計算方式會依窗口內植被分布的離散程度而不同，因此，以處理區塊中計算出之所有光子的高程標準差依四分位數分為四種類別代表光子的垂直分布狀況(Canopy Level)，分類後成果如圖 13 所示：

- (1) Open Canopy：SD 低於第一四分位數，表示光子在垂直方向屬於集中分布。
- (2) Canopy Level 1：SD 介於第一四分位數及中位數之間。

- (3) Canopy Level 2 : SD 介於中位數及第三四分位數之間。
- (4) Canopy Level 3 : SD 介於第三四分位數及最大標準差之間，
表示光子之垂直方向分布較分散。

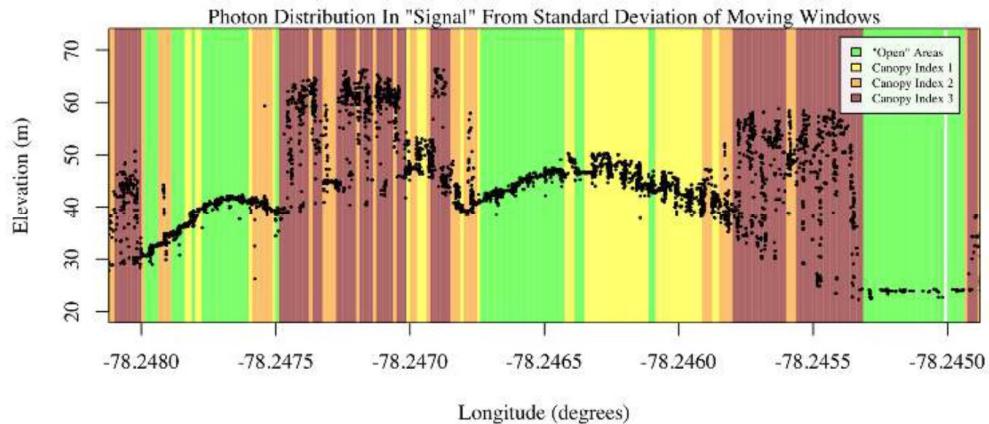


圖 13 光子離散程度分類示意圖 (Neuenschwander et al., 2019)

(三) 最終地面計算及標記地面光子

最終地表之計算由各種中階地表 Asmooth、Interp_Aground、AgroundSmooth 組合而成，而最終地表計算方式依處理區塊中是否存在樹冠而不同：

1. Canopy Flag=0 之處理區塊：最終地表由 AgroundSmooth 表示。
2. Canopy Flag=1 之處理區塊：最終地表由處理區塊內各個位置的 Canopy Level 組合而成。

(1) 在沿軌道方向上任一有樹冠光子存在之處，最終地表由 AgroundSmooth 表示，其中，在 Canopy Level=3 之處，最終地表由 $\text{Interp_Aground} * 1/3 + \text{AgroundSmooth} * 2/3$ 表示。

(2) 在處理區塊內的其餘位置，最終地表則由 $\text{Interp_Aground} * 1/2 + \text{Asmooth} * 1/2$ 表示。

此最終地表經由過濾及平滑處理後，以平滑後之最終地表為中心，依點散函數(Point Spread Function, PSF)產生一環域範圍(圖 14)，落於此環域內之光子標記為地面光子。點散函數係指各項誤差的合成可視為是光子在表面上之擴散，此處誤差包含 ATLAS 儀器測距精度、徑向分布軌道誤差、地理定位狀況、前向散射等等原因。

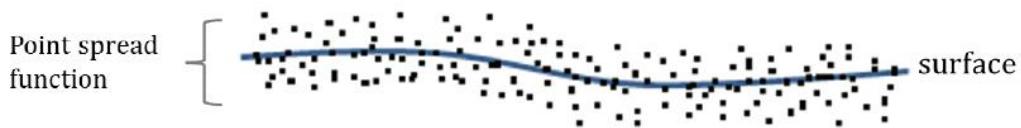


圖 14 點散函數示意圖 (Neuenschwander et al., 2019)

(四) 樹冠光子標記

最終地表完成確定後，針對具有樹冠的處理區塊進行樹冠光子的標記，且為避免錯誤分類之問題，針對樹冠光子及 TOC 光子提出檢核機制，將分類錯誤之光子重新標記為雜訊(Neuenschwander & Pitts, 2019)。

依據前述找出的初始 TOC 光子進行過濾、平滑及檢核，由檢核後保留之初始 TOC 光子內插產製一 TOC 表面(Interp_Acanopy)，用以作為樹冠光子的上界線，並以 Interp_Acanopy 與最終地表之 PSF 環域範圍為兩基礎面，標記位於兩表面之間的光子為樹冠光子，並再次進行檢核，其後仍保留的 TOC 光子便如前述內插產製一新的 Interp_Acanopy 表面，並以新產製之 Interp_Acanopy 與最終地表之 PSF 環域範圍進行樹冠光子標記。

(五) 樹冠區最終地表重製

由於最終地表是依樹冠存在與否作為依據採用不同計算方式產生，雖前述已產製最終地表，然而，由於 Canopy Flag=1 之處理區塊的樹冠光子經由濾除而重新分類，因此需針對 CanopyFlag=1 之處理區塊內沿軌道之各個位置重新計算最終地表：

1. 沿軌道方向上有樹冠存在之處，由 AgroundSmooth 表示。
2. 沿軌道方向上無樹冠存在之處，由 Interp_Aground 表示。

此重製之最終地表經由過濾及平滑處理後，將落於其 PSF 範圍內之光子標記為地面光子，並以此重製之地表與 Interp_Acanopy 重新標記兩平面之間的光子為樹冠光子。

(六) 光子分類標記

依據最終產製之地表及 TOC 所產製之 Interp_Acanopy 表面，將信號光子分別標記為 TOC、樹冠、地面光子及雜訊，如圖 15 所示，分類方式如下述：

1. TOC 光子：初始 TOC 光子經前述步驟(四)最後檢核後仍保留之光子。
2. 樹冠光子：位於地表面 PSF 環域之上且低於 Interp_Acanopy 之光子。
3. 地面光子：以最終地表為中心，落於 PSF 環域內之光子。
4. 雜訊：落於 TOC 光子之上及落於地表面 PSF 環域範圍之下的光子。

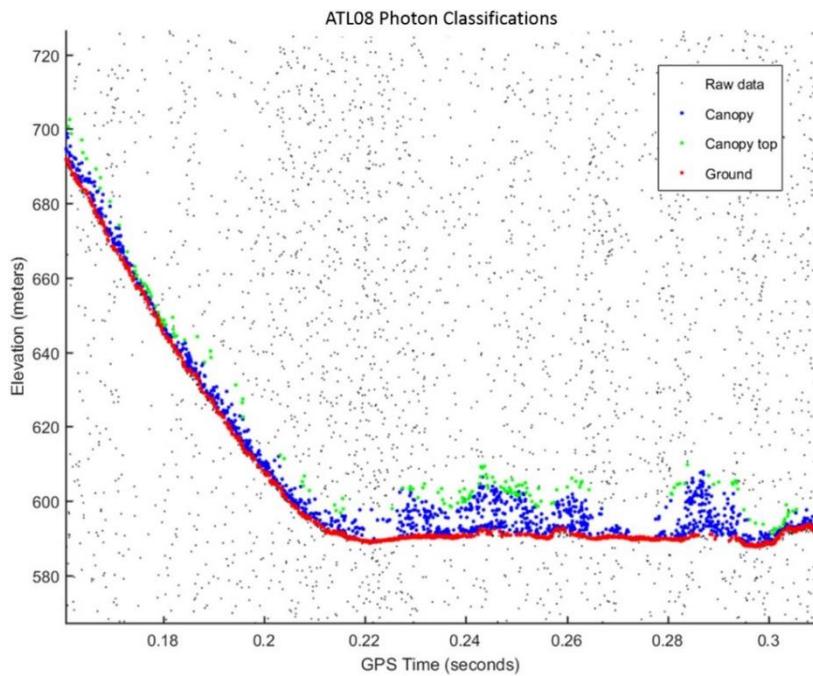


圖 15 光子標記示意圖 (Neuenschwander & Pitts, 2019)

(七) 高程產品產出

光子分類完成後，即可計算 ATL08 高程產品的各項高程參數，ATL08 產品以 100 公尺為單位，產製沿軌道上每 100 公尺範圍內的高程參數。依據經驗，在植被覆蓋的區域，100 公尺的空間單元內約可有 140 個信號光子，若此範圍內的信號光子數量少於 50 個，因信號光子數量過少故此空間單元不會產出任何地表或樹冠高程產品；若空間單元內信號光子數量大於 50 個，則將地面光子萃取出，並計算各項地面產品(Neuenschwander & Pitts, 2019)。

當地面光子數量少於空間單元內總信號光子數之 5% 時，因地面光子數量過少，故地面高程產品不會產出；而當地面光子數量大於空間單元內總信號光子數之 5% 時，則依據空間單元內的地面光子計算各項地面高程產品，如平均數、中位數、最大值、最小值等等，並以空間單元之中點產生一經過地形校正的參數($h_{te_bestFit}$)，此高程參數係經由線性、三階多項式、四階多項式擬合地面光子而得之參數，並選擇擬合

誤差中，標準差最小的擬合方式作為此參數的計算方式 (Neuenschwander & Pitts, 2019)。

三、ATL08 相關研究

經由 NASA 針對 ICESat-2 ATL08 提出之地面高程演算法，ATLAS 所收集之資料可用於計算地形高程值，現已有部分研究針對 ATL08 地形高程精度進行驗證：

Neuenschwander & Magruder (2019)利用高精度機載光達評估 ATL08 地表高程值於芬蘭之高程精度，研究中使用約一千個 ATL08 高程點計算得出平均絕對誤差小於 0.5 公尺、RMSE 約為 0.85 公尺之成果，且 ATL08 高程與機載光達高程高度相關($R^2 = 0.99$)；Neuenschwander et al., (2020)進一步針對 ATL08 地形高程產品依不同之資料收集狀況，以機載光達進行高程精度評估，在約 90 萬個 ATL08 高程樣本中，不論強弱光束及有無雪覆蓋的資料收集狀況下，對於所有收集狀況而言得出平均絕對誤差 0.49-0.59 公尺、平均誤差 0.07 公尺及 RMSE 為 0.65-0.83 公尺的成果；除了以 ATL08 產製之地表高程產品進行精度驗證之研究之外，亦有使用光子形式進行高程精度驗證之研究，Xing et al., (2020)於森林地形中結合使用 ATL03 分類出的高可信度光子與 ATL08 分類為地面之光子產製出 DEM 剖面，並與高光譜機載光達產製之 DEM 相比較，由各項統計值指出六條光束表現皆良好，其中強光束皆優於弱光束。

綜上所述，由前人研究可知 ATL08 具有良好之高程精度，且 Liu et al., (2020)進而以 ATL08 作為參考資料評估不同 GDEM 之精度，經由前人之相關研究，可證實 ICESat-2 高程資料具實用性。ICESat-2 ATL08 為較近期開放之資料，因而其相關研究尚於發展階段，但由前人研究中已可見其潛力，

待其持續蒐集資料並完成任務後，預估能提供更充足之高程資訊作為更多的應用。



第四節 高程精度驗證方法

前述幾節分述 ICESat-2 之相關介紹，欲針對 ICESat-2 地形高程進行分析則須了解過往 GDEM 於地形高程精度驗證之方法，因而本節著重回顧相關高程精度驗證方法。

直至今日已發展出許多不同的 GDEM，亦有許多針對各種 GDEM 進行高程精度驗證的研究，然因各個研究使用不同種類及版本的 GDEM、不同之研究區域以及使用不同的地形資料做為參考資料，種種因素使得每個研究皆不盡相同(Varga & Bašić, 2015)，以下針對常見之 GDEM 高程驗證方法進行回顧。

GDEM 高程精度分析中，可分為針對單一種 GDEM 進行高程精度驗證以及同時驗證多種 GDEM，比較不同 GDEM 間的高程精度，其中以 SRTM、ASTER GDEM 較常被用於分析(Varga & Bašić, 2015)。精度評估之方法係以目標 DEM 與參考 DEM 相減後計算高程誤差的各項敘述性統計值，如平均誤差(ME)、標準差(SD)、均分根誤差(RMSE)、不同信心水準下之高程誤差(LE)等等，其中以平均誤差與均分根誤差最常用於分析，平均誤差表示兩 DEM 之間的偏差(Gesch et al., 2012)，正值表示在整體上該 DEM 有高估的狀況，負值則表示整體上高程低估，而均分根誤差則用於表示該 DEM 的高程精度，當均分根誤差的值越大表示該 DEM 精度越差。分析中使用之參考 DEM 通常為光達資料、GPS、地面控制點、地區型 DEM 等等不同型態的地形資料，以其作為比較基準來評估目標 DEM 的精度狀況。

此外，影響 DEM 精度的因素包含參考 DEM 的精度、地形特徵以及地表特性等等(Bolstad & Stowe, 1994; Pakoksung & Takagi, 2021)，故過往研究在地形特徵上會以不同坡度、海拔高度與坡向等等面向來分析 DEM 於不同特徵上的特性，藉由劃分該地形特性為不同的特性級別後，計算各個級

別下的敘述統計值，並由敘述統計值的比較與歸納後呈現該 DEM 之精度與高程特性。此外，地形起伏通常與地表上的土地覆蓋有關(Hu et al., 2017)，如建物多為平坦區域之地表覆蓋類別，而地形起伏較大之區域則較傾向發展為林地，因而不同土地覆蓋類別會形成不同的地表特性，土地覆蓋類別造成地表特性亦為影響 DEM 精度之因素之一，且使用不同測量技術產製 DEM 時，通常也受地表覆蓋所影響(Hu et al., 2017)，因此，DEM 精度的評估亦多考慮土地覆蓋對於精度的影響，針對過往 GDEM 高程精度評估之文獻統整於下表 3。

綜上所述，雖各個研究中評估 DEM 之方式不盡相同，然經由相關文獻的統整，可發現其大多都以海拔高度、坡度及土地覆蓋類別面向分析其對於 DEM 精度的影響，故本研究即以海拔高度、坡度及土地覆蓋類別此三種不同面向之影響因子作為評估 ICESat-2 ATL08 高程特性之因子。

表 3 GDEM 高程精度評估之統整

文獻	研究區域	評估之 GDEM	參考 DEM	研究方法	考慮面向
Gesch et al., (2012)	USA	ASTER GDEM v2, NED, SRTM, ASTER GDEM v1	GPS	ME, SD, RMSE, LE95	Altitude, Land cover(LC), Scene Number
Varga & Bašić, (2015)	Croatia, Balkan Peninsula	ETOPO1, GTOPO30, GMTED2010, ACE2, SRTM30+, SRTM, ASTER	GCP	ME, RMSE, MED, MAD, PCC....	Altitude, Slope, LC
Santillan & Makinano-Santillan, (2016)	Mindanao, Philippines	SRTM 30m AW3D30 ASTER GDEM2	GCP	ME, RMSE,	Altitude, LC
Hu et al., (2017)	Hubei, China	SRTM 1, SRTM 3, AW3D30, ASTER GDEM	Local DEM	ME, SD, 5% quantile, 95% quantile	Terrain types, Slope, LC
Wessel et al., (2018)	Global continent & USA	TanDEM-X	GPS	ME, SD, RMSE, LE90...	Slope, LC
Pakoksung & Takagi, (2021)	Shikoku Island, Japan	GSI, ASTER, SRTM, GMTED2010, HydroSHEDS, GTOPO30	GCP	ME, SD, RMSE, PCC...	Altitude, Slope, LC



第三章 研究方法

第一節 研究區域

由於 ICESat-2 ATL08 地形高程產品於光子不足之區域不會產製地形高程資訊，故並非所有地區皆有密集的資料量，為避免資料量不足之問題，考量研究資料數量及現有之公開資料後，設定本研究區域為台灣本島，用以廣納充足之 ICESat-2 高程點，研究區域圖如圖 16 所示。

台灣位於東經 120° 至 122°，北緯 22° 至 25° 之間，面積約 3.6 萬平方公里，由諸多地形組成，如山脈、丘陵、台地、平原等，以山地所占面積最大，500 公尺以上的山地約占全島面積之 45%，台灣形狀與山脈略呈南北走向，面積狹長且地勢高聳陡峻，本島中央為峰巒疊起的群山，多為生態保安林地，西部區域地勢平坦，為主要經濟活動、基礎建設及農田耕作聚集區。



圖 16 研究區域

第二節 研究資料與處理工具

本節介紹本研究所使用之資料與研究主要使用之軟體，研究資料包含 ICESat-2 ATL08 地形高程產品、參考 DEM、土地覆蓋產品。

為符合本研究區域之設計，需使用涵蓋完整台灣本島之數值高程模型，目前免費且涵蓋完整台灣本島之數值高程模型由內政部所提供之內政部新版臺灣本島 20 公尺網格數值地形模型資料(2020 年 6 月 24 日版)為參考 DEM；此外，為避免自行使用光學影像製作土地覆蓋分類時造成的破碎問題，本研究選擇使用目前可取得之全球土地覆蓋開放資料，於比較數種開放資料於台灣土地覆蓋之精度後選用精度最佳者；資料處理與分析則使用 ESRI 開發之地理資訊系統軟體 ArcGIS Pro 及 R Studio 軟體。

本研究主要之研究資料為 ICESat-2 ATL08 地形高程產品，可於 NSIDC(<https://nsidc.org/data/at108>) 網站免費下載，其下載之資料格式為 HDF5 格式檔，係將眾多參數、資訊進行儲存及管理的一種資料格式，經由程式語言方可獲取資訊內容。NSIDC 另有開發一可方便獲取及可視化 ICESat-2 資料之平台，即 OpenAltimetry，如 17 所示，經由該平台可下載 ICESat-2 Level-3A 的各項產品，並提供相應之基本高程資訊。ICESat-2 通過台灣本島之地面參考軌道共有 16 條，本研究所使用之資料日期起始日為 2018 年 10 月 14 日，即 ICESat-2 發射後可得之台灣本島第一筆資料，並收集台灣本島所有之資料至 2020 年 7 月，表 4 詳列本研究所使用之資料採樣日期：

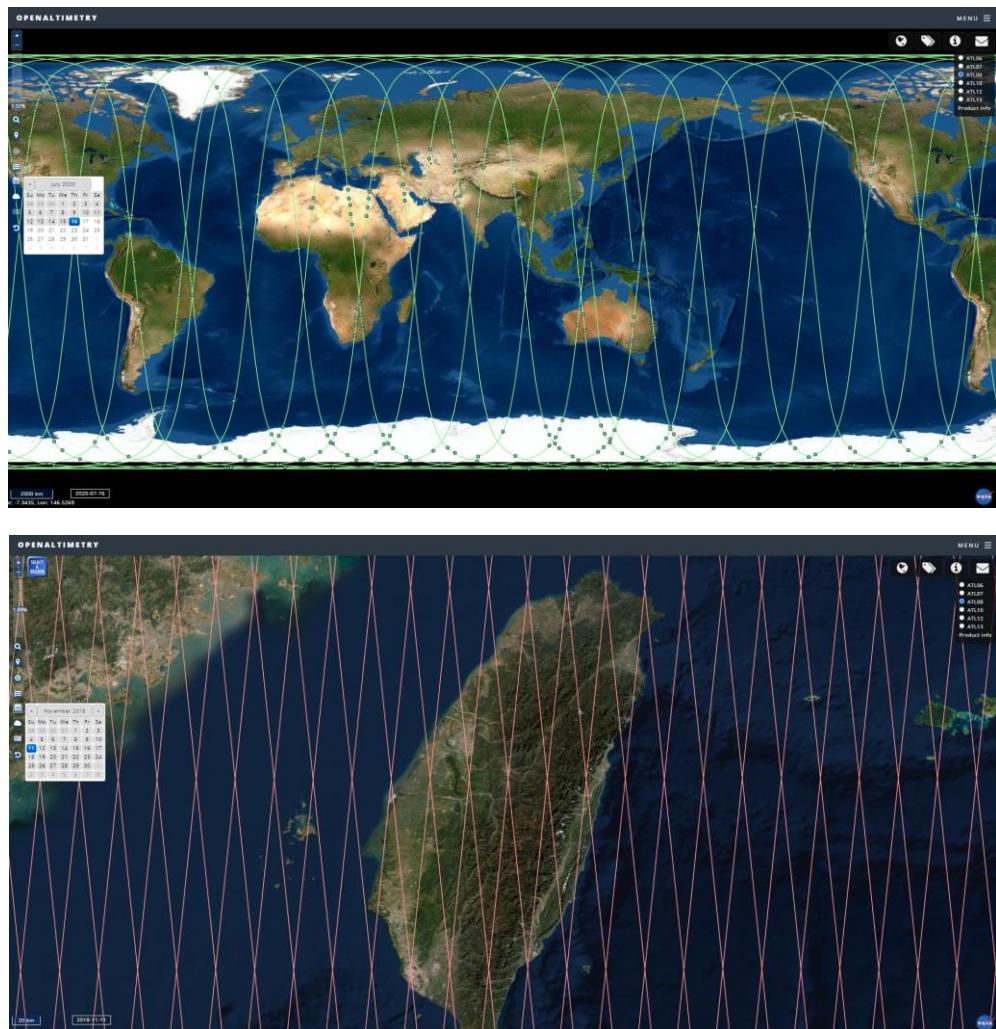


圖 17 OpenAltimetry 網站示意圖 (OpenAltimetry,
<https://openaltimetry.org/data/icesat2/>)

表 4 ICESat-2 ATL08 使用資料表

Track ID	Date	Elevation Point Count	Track ID	Date	Elevation Point Count
11	20181229	4,170	689	20190211	4,898
	20200626	1,745		20190513	8,756
72	20190402	3,177		20190812	395
	20191001	4,028		20191111	7,803
	20200331	418		20200209	5,882
	20200630	4,843		20200510	4,791
125	20190406	928	895	20190825	1,402
	20191005	2,254		20200524	259
	20200103	3,479	956	20181130	5,185
	20200703	1,283		20190301	4,669
186	20190109	3,632		20190530	4,638
	20190410	4,921		20190829	2,949
	20190710	1,259		20191128	4,683
	20191009	2,509		20200227	1,817
	20200107	7,297		20200528	310
247	20181014	1,831	1017	20181204	7,953
	20190113	232		20190305	187
	20190414	1,419		20190603	1,408
	20190714	2,725		20191202	2,366
	20200111	74		20200302	4,919
	20200711	687		20200601	6,481
453	20181028	4,559	1070	20190906	1,988
	20190427	1,864		20200305	934
	20190727	2,124		20200604	2,821
	20191026	922	1131	20190312	1,064
514	20190131	3,155		20190611	359
	20191030	480		20190910	2,535
	20200429	4,166		20191209	5,728
628	20181108	6,718		20200309	526
	20190207	3,946		20200608	57
	20191107	3,820		1337	20200622
	20200205	6,451	Total		190,695

第三節 研究流程與理論基礎

本研究使用 ICESat-2 ATL08 地形高程資料為研究資料，分析其於台灣本島之精度，觀察其高程資料之特性，並以內政部公告之台灣本島 DEM 做為參考 DEM。

本研究流程主要將 ICESat-2 ATL08 地形高程資料與參考 DEM 進行比較，並將研究區域依 GDEM 常用於評估精度之影響因子進行精度評估，包含土地覆蓋類別、坡度及海拔高度此三種影響因子，精度評估方法則以敘述統計計算各項高程誤差統計值，用以評估高程精度並加以分析其特性。

由於 DEM 應用上習慣以行政區以及分幅的方式來管理及查找，故本研究進一步以不同空間單元來分析 ICESat-2 ATL08 地形高程特性，行政區以鄉鎮市區為單元，分幅以基本地形圖比例尺五千分之一圖框為單元，並於最後分析不同空間單元下各影響因子與高程誤差之趨勢。

各項研究流程之方法與理論基礎將於下詳細介紹，另繪製本研究流程圖於圖 18 供參考：

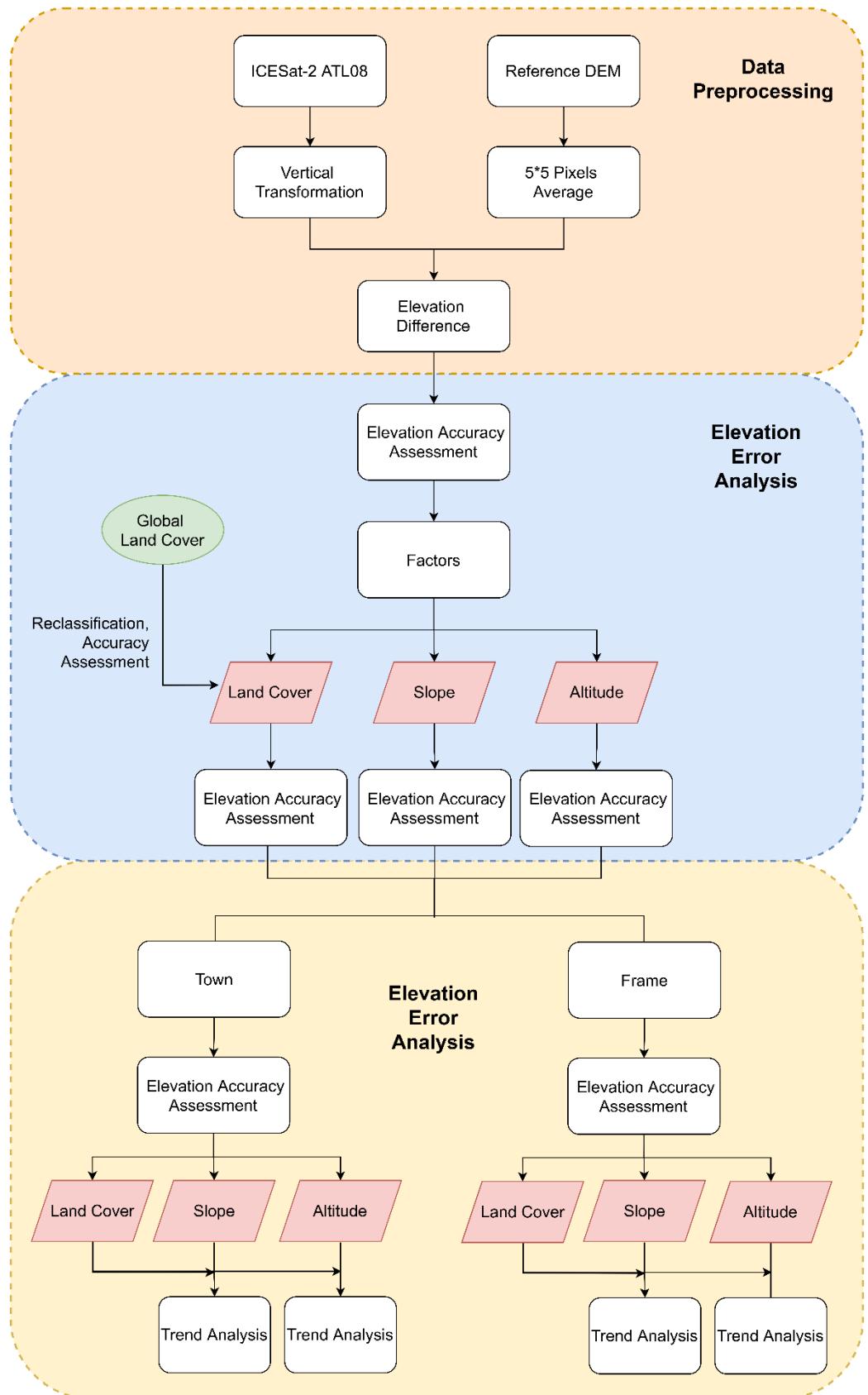
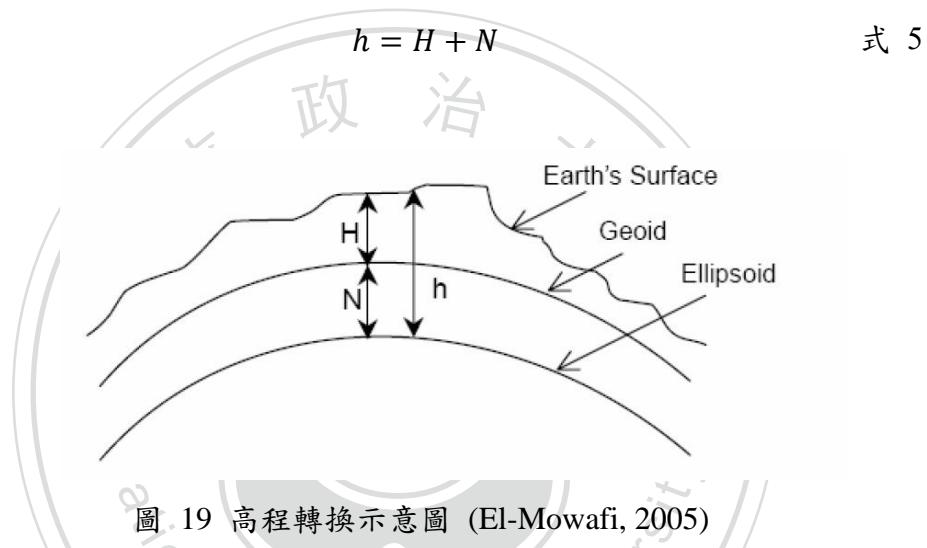


圖 18 研究流程圖

一、資料前處理

(一) 高程轉換

高程基準可分為以大地水面為基準之正高 H 及以參考橢球體為基準之橢球高 h ，由於橢球面與大地水準面不重合，因此，兩個基準面之間存在一段分離量，稱為大地起伏 N ，即大地水準面沿法線到橢球面之距離(林老生，2012)，正高、橢球高、大地起伏三者之示意圖如圖 19，並可由式 5 表示。



比較兩高程資料時，兩資料須為同一高程基準才得以進行高程比較，由於 ICESat-2 高程值是以 WGS84 參考橢球體為基準之橢球高，而本研究的參考 DEM 是以大地水面為基準之正高，兩者非同一高程基準，因此，需將 ICESat-2 之橢球高進行高程轉換，使其與參考 DEM 的高程基準一致。本研究以內政部國土測繪中心之 e-GNSS 系統三維坐標轉換服務平台進行高程轉換，該平台使用內政部公告之臺灣地區大地起伏模型成果進行轉換計算，其使用之參考橢球體為 GRS80，然 GRS80 與 WGS84 之橢球參數大致相同，因此兩者之差異可忽略。由已知之點位坐標及橢球高以大地起伏模型內插求得該點位之大地起伏

值，並由式 6 以已知之橢球高減去大地起伏模型之大地起伏值即可計算該點位之正高值。

$$H = h - N$$

式 6

(二) DEM 平滑化

由於 ICESat-2 ATL08 高程參數是以每 100 公尺為空間單元產生一高程參數，而參考 DEM 網格大小為 20 公尺，兩資料之高程值代表的空間單元不一致時將無法完整說明該高程值在空間上所代表的範圍，因而在比對兩高程資料時，需先使兩資料的空間單元大小一致，故以參考 DEM 網格周圍 $5*5$ 網格大小之範圍計算平均高程值，即為高程的平滑化，以重新計算過後之參考 DEM 作為後續與 ICESat-2 比較之高程資料。

(三) 高程差計算

將 ICESat-2 高程點與平滑化後之參考 DEM 進行高程差值計算，萃取出 ICESat-2 高程點對應之平滑化參考 DEM 高程值，並與 ICESat-2 高程值相減可得兩高程資料之高程差值 ΔH ，如式 7 計算：

$$\Delta H = H_{ICESat-2} - H_{reference\ DEM}$$

式 7

二、影響因子萃取

本研究考慮之因子為地形特徵及土地覆蓋類別，其中地形特徵包含坡度及海拔高度，坡度係以參考 DEM 計算而得；海拔高度為參考 DEM 之高程；土地覆蓋由四種全球土地覆蓋開放資料相互比較其解析度及其於本研究區域之精度後，以精度最佳者作為本研究之土地覆蓋資料。

四種全球土地覆蓋開放資料包含 GLCS-LC100、FROM-GLC30、FROM-GLC10、GlobeLand30，GLCS-LC100 為歐洲監測地球之哥白尼計畫

(Copernicus Programme)下 Copernicus Global Land Service 所提供之 100 公尺解析度全球土地覆蓋資料，其於 2015 年起提供每年全球土地覆蓋圖；FROM-GLC30、FROM-GLC10 由 Gong et al., (2013)、Chen et al., (2019) 所提供，因全球土地覆蓋資料解析度通常為數百公尺，解析度較低，而其提供全球 30 與 10 公尺高解析度之土地覆蓋資料；GlobeLand30 則為 Chen et al., (2015) 提供之 30 公尺解析度全球土地覆蓋資料，以下統整此四種全球土地覆蓋資料之比較表於表 5。

表 5 土地覆蓋資料表

全球土地覆蓋圖	資料版本	整體精度	解析度(m)	LC 類別數量
GLCS-LC100	V2019 (3.0.1)	80.30%	100	23
FROM-GLC30	V2017	72.78%	30	10
FROM-GLC10	V2017 (0.1.3)	>71%	10	10
GlobeLand30	V2020	>80%	30	10

經由重分類(Reclassify)將原始土地覆蓋分類分為本研究使用的五種土地覆蓋類別，建成地、耕作地、裸露地、水源地、林地，而後針對本研究區域進行精度驗證。本研究使用混淆矩陣(Confusion Matrix)進行精度評估，計算生產者(Producer Accuracy, PA)、使用者(User Accuracy, UA)、整體精度(Overall Accuracy, OA)與 Kappa 系數(Congalton, 1991)，各項計算方式如下式，混淆矩陣示意表如表 6。

精度評估方式以 ArcGIS PRO 軟體建立隨機抽樣(Random Sampling)之抽樣點(Sampling Point)進行評估，依抽樣方式可分為：

(一) 簡單隨機抽樣(Simple Random Sampling)：於影像上建立隨機分布的樣本點。

(二) 均勻分層隨機抽樣(Equalized Stratified Random Sampling)：在每個類別建立隨機分布的樣本點，且每類別的樣本點數量相同。

(三) 分層隨機抽樣(Stratified Random Sampling)：在每個類別建立隨機分布的樣本點，且每類別的樣本點數量與該類別面積成比例。由於研究區域中各土地覆蓋類別的面積皆不相同，為避免各類別樣本點數量分布不均，且為保持精度檢核的一致性，本研究採用均勻分層隨機抽樣，使每種土地覆蓋類別中的樣本點點數一致。

依 Congalton(1991)建議之經驗法則而言，每類別的樣本點數量應至少達 50 個樣本點，但若研究區域大於一百萬英畝或類別超過 12 種類別時，則每類別樣本點數量應至少達 75 至 100 個樣本點，而本研究區域面積較大，因而選擇以每類別 100 個樣本點進行精度檢核。

表 6 混淆矩陣示意表

Classified Data	Reference Data						
		Developed	Cultivated	Barren	Water	Forest	UA
	Developed	χ_{11}	χ_{12}	χ_{13}	χ_{14}	χ_{15}	UA_1
	Cultivated	χ_{21}	χ_{22}	χ_{23}	χ_{24}	χ_{25}	UA_2
	Barren	χ_{31}	χ_{32}	χ_{33}	χ_{34}	χ_{35}	UA_3
	Water	χ_{41}	χ_{42}	χ_{43}	χ_{44}	χ_{45}	UA_4
	Forest	χ_{51}	χ_{52}	χ_{53}	χ_{54}	χ_{55}	UA_5
	PA	PA_1	PA_2	PA_3	PA_4	PA_5	OA

$$PA_i = \frac{\chi_{ii}}{\sum_{i=1}^k \chi_{ij}} \quad \text{式 8}$$

$$UA_i = \frac{\chi_{jj}}{\sum_{j=1}^k \chi_{ij}} \quad \text{式 9}$$

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^k \chi_{ii}}{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k \chi_{ij}} \quad \text{式 10}$$

三、地形高程誤差評估

描述兩高程值間之關係時，敘述統計為評定高程資料常用之方法(林老生，2012; Wang et al., 2019; Liu et al., 2020)，包含計算高程值之 ME、SD、RMSE 等等統計值，可用於描述兩資料間高程值之關係，其計算方式如下：

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i \quad \text{式 11}$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta H_i - ME)^2} \quad \text{式 12}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta H_i)^2} \quad \text{式 13}$$

經由前述萃取不同影響因子後，分別計算 ICESat-2 ATL08 高程點於不同影響因子的各項敘述統計值，並以計算出之敘述統計值互相比較，用以初步了解不同影響因子對於 ICESat-2 ATL08 地形高程測量之影響。

此外，除了以高程點為單元進行分析外，本研究進而以 DEM 管理及應用上慣用之行政區鄉鎮市區單元與基本地形圖比例尺五千分之一參考索引圖框進行不同空間單元之高程誤差分析，且同樣以前述三種不同影響因子分析其對於不同空間單元之 ICESat-2 ATL08 地形高程的影響。

四、趨勢分析

為了解不同空間單元中各因子與高程誤差間之關係，本研究採用散布圖表示兩者間之關係，其為常用於表示兩變數間關係之可視覺化的方法，然於龐雜之資料、稀疏之資料或變數間關係較微弱之資料中較難直接以視覺辨識出散布圖中兩變數間之關係，因而通常將散布圖擬合為平滑曲線來幫助辨識(Jacoby, 2000)。擬合平滑曲線的方式可分為參數擬合與非參數擬

合(Cleveland, 1993)，回歸分析即常見之參數擬合方式，由於參數擬合需先指定出適用於該資料之函數形式，然而正確且適用的函數形式較不易指定，而非參數擬合則無需指定變數間之函數形式(Jacoby, 2000)，因而本研究採用非參數擬合之方式。

Cleveland (1979) 所提出之局部加權迴歸散布圖平滑法 LOWESS(Locally-weighted regression scatterplot smoother)即為常見之非參數擬合方式，又稱為 LOESS(Locally weighted regression)(Cleveland & Devlin, 1988)，係以局部資料擬合多項式回歸曲線，因而可觀察到資料在局部狀態下之趨勢。



第四章 研究成果

本研究針對 ICESat-2 進行地形高程精度與特性分析，第一節闡述 ICESat-2 ATL08 之精度並以不同影響因子分別進行地形高程特性之分析；第二節基於第一節之基礎，進一步分析 ATL08 地形高程於各鄉鎮市區單元的特性；第三節則以比例尺五千分之一參考索引圖框為單元分析 ATL08 高程特性；第四節統整一至三節之成果。

第一節 ICESat-2 地形高程特性分析

本節以研究區域中 ICESat-2 ATL08 地形高程點分析其於台灣本島之高程精度，並針對土地覆蓋類別、坡度、海拔高度此三種影響因子進行高程特性分析。

一、地形高程精度

本研究區域中共有 190,695 個 ICESat-2 ATL08 地形高程點，經由與參考 DEM 相比後，於約十九萬個高程點的計算下可得 ME 為-0.337 公尺，SD 為 9.560 公尺，RMSE 為 9.565 公尺，用以表示其於台灣本島之高程精度，由高程精度數據顯示 ICESat-2 ATL08 之地形高程於整體上略低於參考 DEM，另將高程誤差呈現於圖 20，並將其擬合為常態分布曲線，由高程誤差分布可知 ICESat-2 ATL08 高程誤差大致呈現常態分布，且誤差主要集中於誤差零的左右兩側區域。

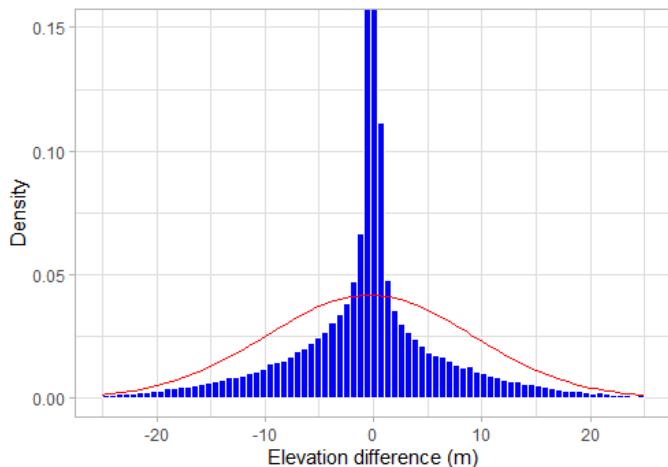


圖 20 ICESat-2 高程誤差分布圖

二、土地覆蓋類別

本研究由四種全球土地覆蓋開放資料中，以本研究區域上精度表現最佳者作為土地覆蓋類別之資料，其中，由於 FROM-GLC30 與 FROM-GLC10 於重分類時較難將其分為本研究所需之五種土地覆蓋類別，因而於評估後只針對重分類後之 GLCS-LC100 與 GlobeLand30 進行精度評估。

以均勻分層隨機抽樣方式於每類別隨機抽樣 100 個樣本點進行精度評估，GLCS-LC100 與 GlobeLand30 之精度評估成果如表 7 所示。根據精度評估之結果，GlobeLand30 於本研究區域之整體精度與 Kappa 係數之表現皆優於 GLCS-LC100，此外，GlobeLand30 之空間解析度為 30 公尺，亦優於空間解析度 100 公尺之 GLCS-LC100，故本研究使用 GlobeLand30 作為土地覆蓋類別之依據。

表 7 GLCS-LC100、GlobeLand30 精度評估

Classified	GLCS-LC100		GlobeLand30	
	class	PA	UA	PA
Developed	0.73	0.56	0.76	0.75
Cultivated	0.46	0.86	0.61	0.72
Barren	0.76	0.38	0.84	0.58
Water	0.93	0.68	0.95	0.87
Forest	0.84	0.95	0.74	0.9
OA		0.69		0.76
Kappa		0.61		0.71

依據 GlobeLand30 的土地覆蓋分類依序將研究區域上之 ICESat-2 高程點分類, ICESat-2 高程點土地覆蓋分類之分布如圖 21 所示, 各類別 ICESat-2 高程點之數量呈如表 8, 建成地之高程點集中於西半部區域, 佔比約 11%; 耕作地之高程點則廣泛分布於西半部與東部部分區域, 高程點數量較多, 佔比約 31%; 裸露地主要分布於中部山區, 此外, 河道上泥沙裸露之河床亦歸屬裸露地, 此類別為高程點數量最少之類別, 僅佔整體的 4%; 水源地包含河流、湖泊與西南部區域的魚塭, 高程點數量略高於裸露地, 佔比約 6%; 林地廣泛分布於西半部以外之區域且橫跨南北, 約佔整體數量之二分之一。

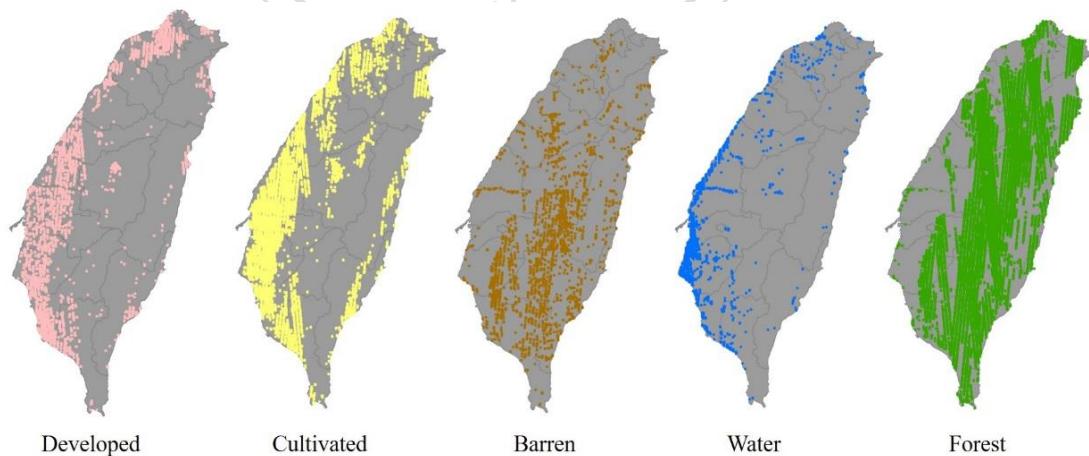


圖 21 ICESat-2 高程點土地覆蓋分佈圖

圖 22 呈現不同土地覆蓋類別的高程誤差分布圖，並將其擬合為常態分布曲線，由高程誤差分布可知各類別之高程誤差大致呈現常態分布，且誤差主要集中於誤差零的左右兩側區域，由圖中常態分布曲線的不同可判斷各類別誤差分布的狀況，常態分布曲線的分布越高窄，表示該類別之 SD 較小，即誤差分布越集中，五種類別中以水源地的常態分布曲線最為高窄，其誤差分布最為集中於誤差零之處，其次依序為耕作地、建成地、裸露地與林地，高程誤差分布以林地最為離散，也表示其誤差分布範圍較廣。

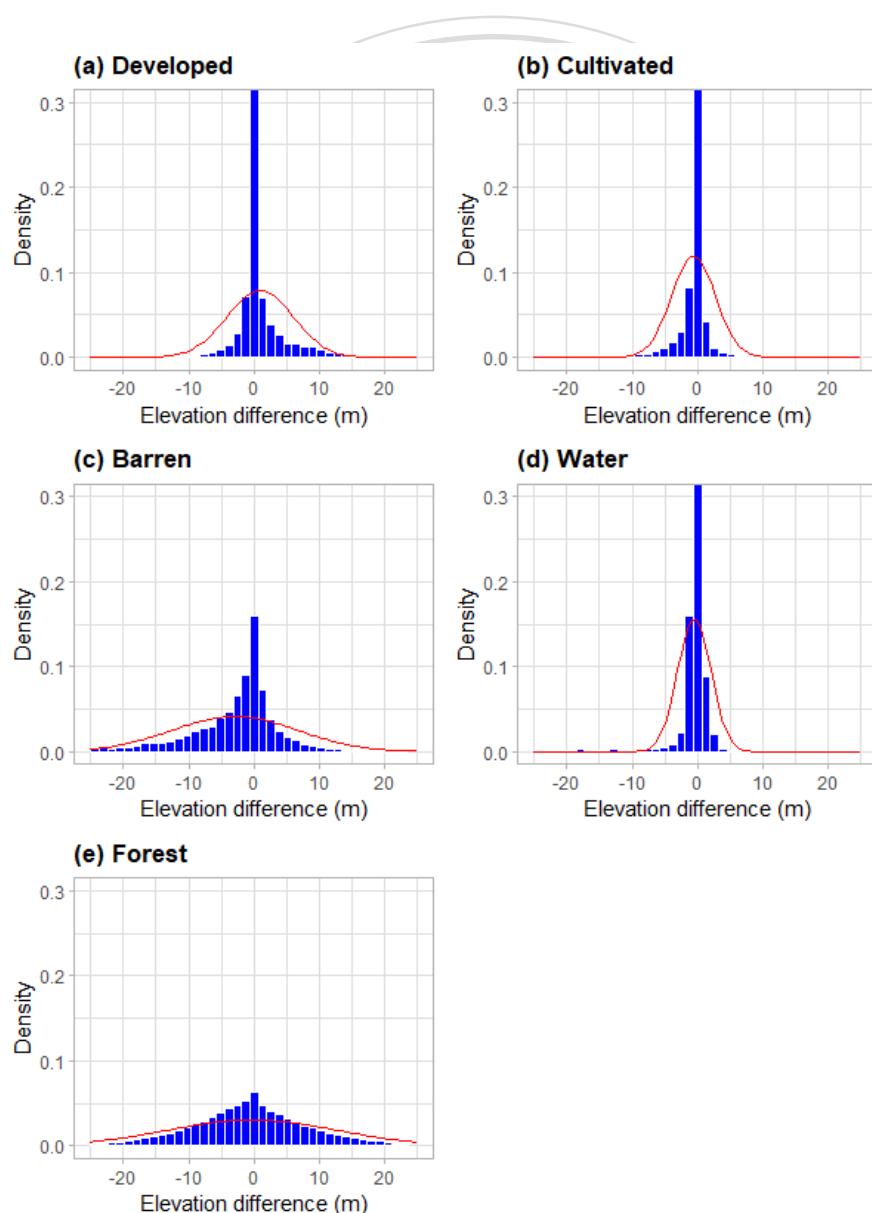


圖 22 ICESat-2 土地覆蓋類別之高程誤差分布圖

另進一步以定量分析方式計算各項高程誤差之敘述統計值，如表 8、圖 23 所示。由 ME 可知相對於參考 DEM 而言，五種土地覆蓋類別中，僅建成地具正向偏差，約 0.92 公尺，表示其高程值在建成區有高估的狀況，對於人造地上物未能完全移除 DSM 之效應(Varga & Bašić, 2015)；除建成地外之土地覆蓋類別皆為負向偏差，約 0.22 至 0.60 公尺，然其屬於偏差較小之負偏差，因而可忽略(Wessel et al., 2018)，唯裸露地具有約 2.8 公尺的負偏差，且由 RMSE 可知其誤差僅次於林地，由於裸露地具有較大之偏差及誤差，因此將裸露地與其他土地覆蓋類別分開進行討論。

前人研究結果中大多指出 DEM 誤差通常隨土地覆蓋由無植被變為完全植被覆蓋而增加(Gesch et al., 2012; Varga & Bašić, 2015; Wessel et al., 2018; Liu et al., 2020)，而本研究中除裸露地外的土地覆蓋類別，誤差最大者為林地，其次為建成地、耕作地及水源地，與前人研究結果相符。

接著，針對本研究中裸露地具較大偏差及誤差進行討論。Wessel et al., (2018)指出裸露地、草地、耕作地等開放土地之 ME 應較小或略低於零偏差，而本研究裸露地具較大偏差，且其誤差與前人研究相異，推測可能係因本研究之裸露地多位於中部山區，屬易發土石崩落之區域，故使其相較參考 DEM 具有較大的負偏差及較大誤差；此外，裸露地與林地之分布高度重疊，易有分類錯誤之問題，使部分林地分類為裸露地，進而造成較大之誤差。

表 8 ICESat-2 土地覆蓋類別之高程誤差敘述統計表

LC	ME	SD	RMSE	Elevation point	
				Count	Ratio
建成地	0.921	5.062	5.146	21,790	11.44%
耕作地	-0.604	3.348	3.403	59,181	31.08%
裸露地	-2.826	9.633	10.039	7,636	4.01%
水源地	-0.488	2.552	2.598	11,321	5.95%
林地	-0.228	13.006	13.009	90,467	47.52%

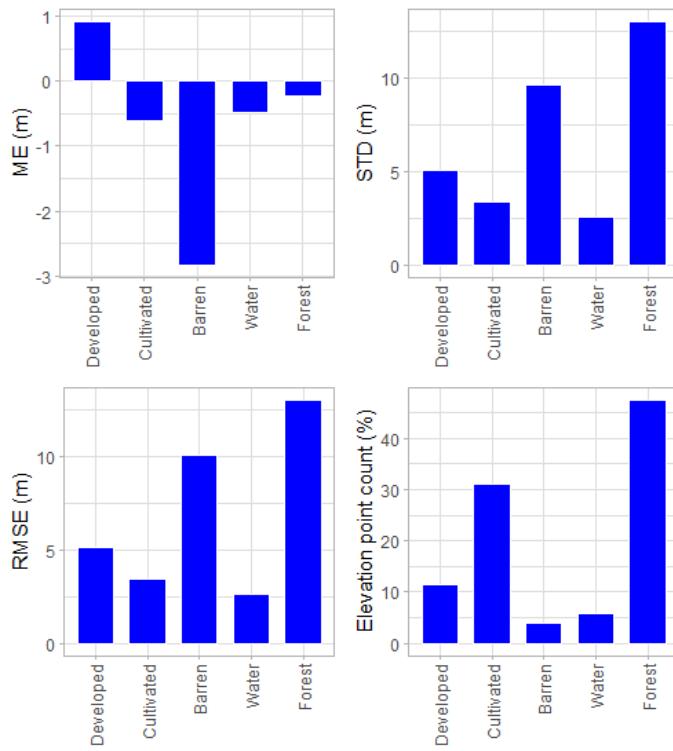


圖 23 ICESat-2 土地覆蓋類別之高程誤差敘述統計圖

三、坡度

地形特徵面向中，坡度與 ICESat-2 ATL08 地形高程誤差的分布狀況如圖 24 所示，可發現高程誤差無偏向於正誤差或負誤差的狀況，整體上均勻分布於正負誤差中，且高程誤差密集分布於誤差零的周圍兩側。本研究進而以不同坡度分級計算誤差統計值，以定量方式對坡度與高程誤差間之關係進行更詳細的分析。

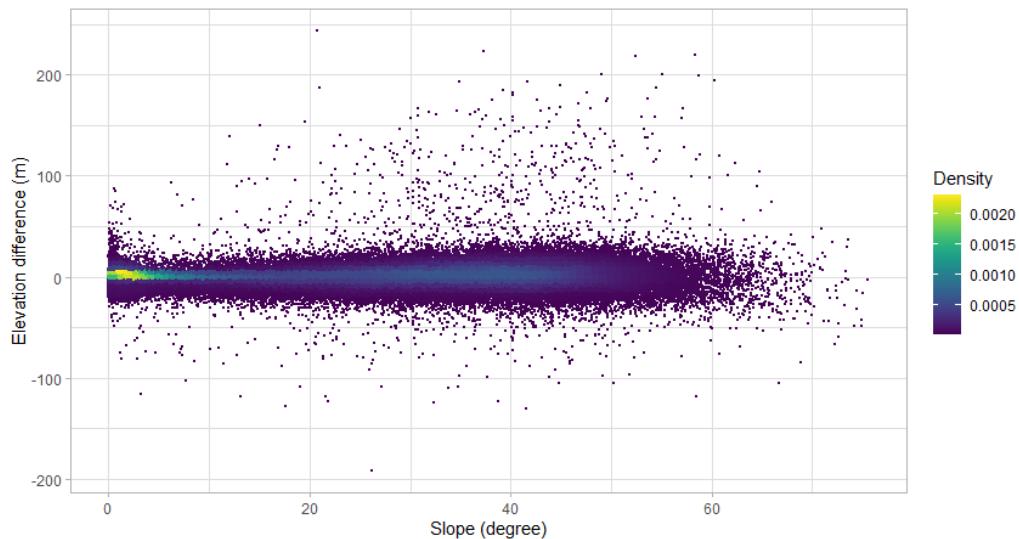


圖 24 ICESat-2 坡度與高程誤差散布圖

以不同坡度分級對研究範圍內之 ICESat-2 地形高程點進行劃分，各坡度分級之高程點分布如圖 25，高程誤差統計值列於表 9。各坡度分級下之高程點以坡度低於 5°者佔比最大，約佔整體高程點數量的一半，不同坡度分級下的高程誤差界於 3.471 至 17.84 公尺間，相較平坦之區域(坡度低於 15°)高程誤差低於 10 公尺，隨坡度級距的增加，誤差也隨之增加，表示坡度對於誤差具有明顯影響，此與 Mukherjee et al., (2013)、Varga & Bašić (2015)、Wessel et al., (2018)、Wang et al., (2019)、Liu et al., (2020)評估不同 GDEM 提出之結論相同。

此外，由各坡度分級之高程誤差兩兩相減，可得坡度分級間之高程誤差增加幅度，如圖 27 中坡度 5°-15°之高程誤差與坡度 0°-5°之高程誤差相減，可得高程誤差增加幅度 A，並依序將坡度分級之高程誤差兩兩相減得高程誤差增加幅度 B、C、D 及 E。圖中可見坡度 15°-25°、25°-35° 以及 35°-45°此三個分級計算之高程誤差增加幅度 C 與 D 之增加幅度較平緩，誤差增加幅度約 1.5 公尺，而其他坡度分級下的誤差增加幅度則較大，約 3 至 4 公尺，表示在坡度 15°至 45°的區域下其高程誤差相較不受坡度增加而影響，

且整體上，高程誤差的增加幅度隨坡度分級的增加而逐漸降低，然而於坡度分級為 45° 以上時，高程誤差增加幅度大幅提升。

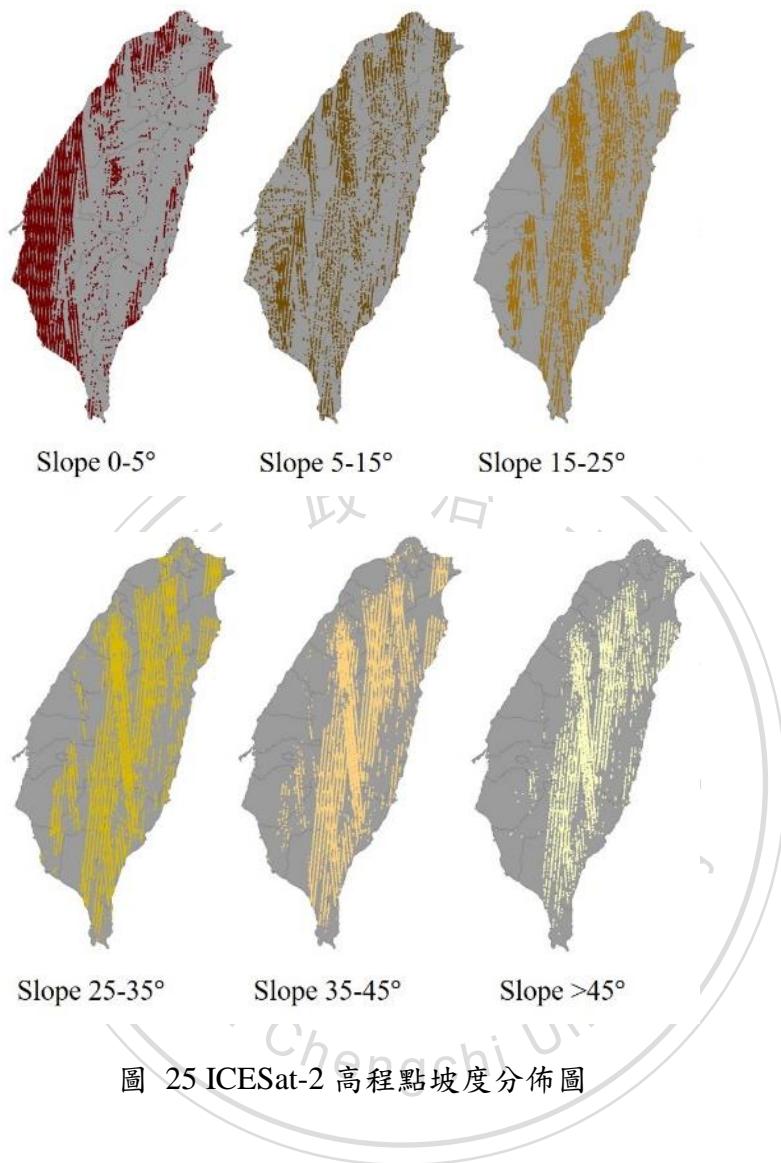


表 9 ICESat-2 坡度之高程誤差敘述統計表

Slope($^\circ$)	ME	SD	RMSE	Elevation point	
				Count	Ratio
0-5	-0.134	3.469	3.471	90,688	47.56%
5-15	-2.174	7.250	7.569	15,867	8.32%
15-25	-1.865	10.536	10.700	17,255	9.05%
25-35	-0.271	12.170	12.173	24,620	12.91%
35-45	0.605	13.741	13.754	28,112	14.74%
>45	0.297	17.839	17.84	14,153	7.42%

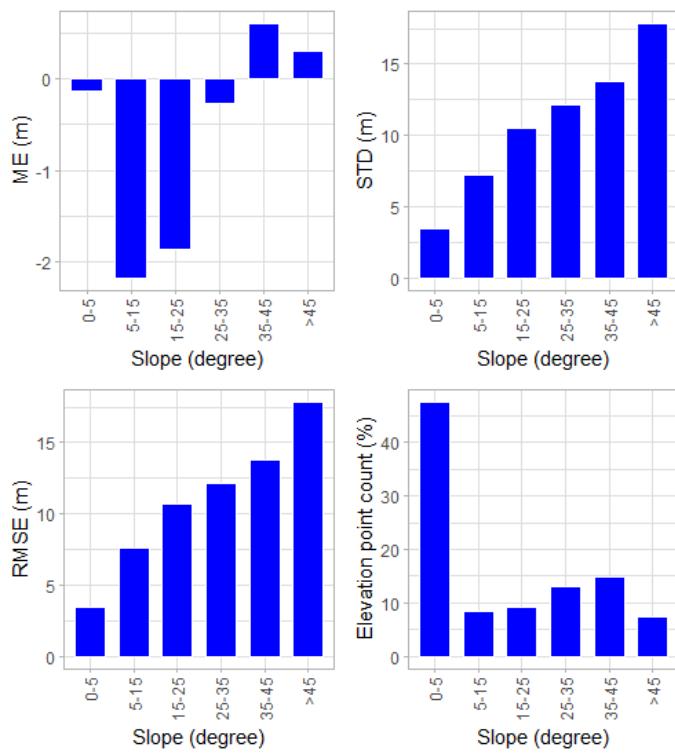


圖 26 ICESat-2 坡度之高程誤差敘述統計圖

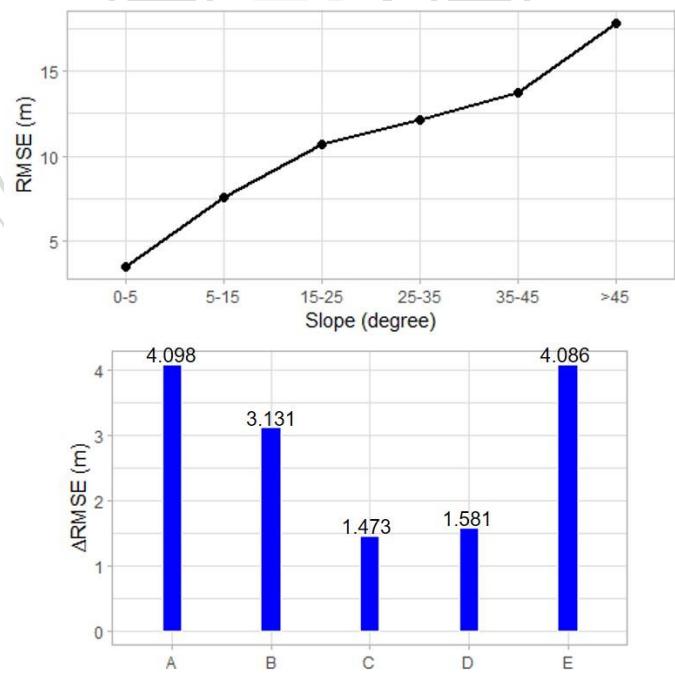


圖 27 ICESat-2 坡度之高程誤差增加幅度圖

四、海拔高度

地形特徵面向中，海拔高度與 ICESat-2 ATL08 地形高程誤差的分布狀況如圖 28 所示，可發現高程誤差無偏向正誤差或負誤差的狀況，整體上均勻分布於正負誤差中，且高程誤差密集分布於誤差零的周圍兩側。本研究進而以不同海拔高度分級計算誤差統計值，以定量方式對海拔高度與高程誤差間之關係進行更詳細的分析。

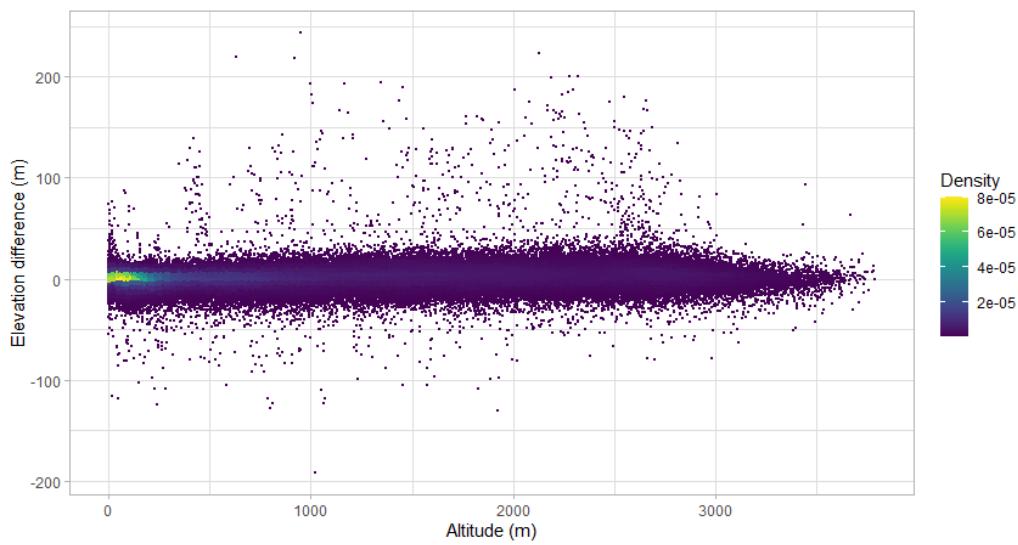


圖 28 ICESat-2 海拔高度與高程誤差散布圖

以不同海拔高度分級對研究範圍內之 ICESat-2 地形高程點進行劃分，各分級高程點分布如圖 29，誤差統計值列於表 10，並以圖 30 呈現。海拔高度分級下之高程點以海拔高度低於 100 公尺者佔比最大，約佔整體高程點數量的一半，不同海拔高度分級下的高程誤差界於 3.848 至 15.677 公尺間，於海拔高度較低之區域(海拔高度低於 400 公尺)，高程誤差低於 10 公尺，隨海拔高度級距的增加，誤差也隨之增加，表示海拔高度對於誤差確有影響，此結果與 Mukherjee et al., (2013)、Pakoksung & Takagi, (2021)評估不同 GDEM 提出之結論相同。

將各海拔高度分級之高程誤差依序兩兩相減，可得分級間之高程誤差增加幅度 A、B、C 及 D，由圖 31 呈現不同海拔高度分級間的高程誤差增加量，高程誤差增加的幅度隨海拔高度分級之增加而趨於平緩，誤差增加幅度由 4.5 公尺逐漸降為 1.5 公尺，表示高程誤差受海拔高度增加而變大的現象於低海拔高度區域相較於高海拔高度區域更有明顯的影響。

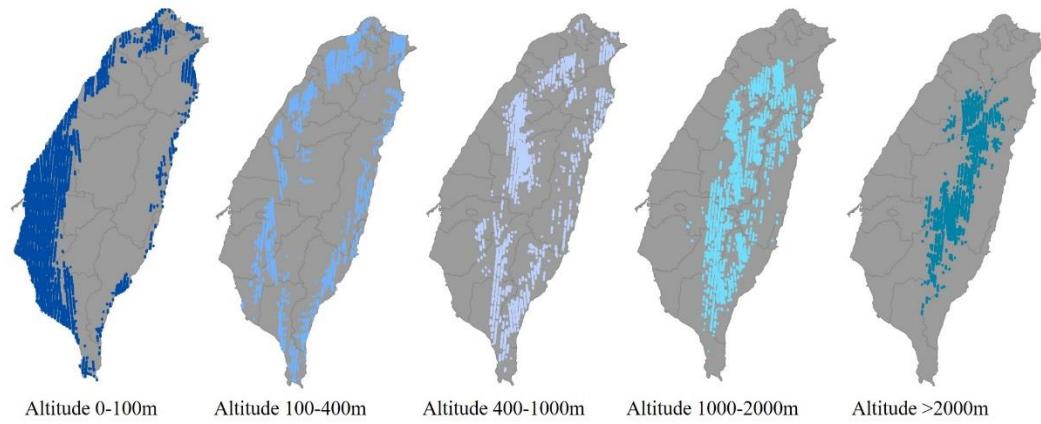


圖 29 ICESat-2 高程點海拔高度分佈圖

表 10 ICESat-2 海拔高度之高程誤差敘述統計表

Altitude(m)	ME	SD	RMSE	Elevation point	
				Count	Ratio
0-100	-0.450	3.822	3.848	91,794	48.14%
100-400	-2.785	7.823	8.303	24,243	12.71%
400-1000	-1.733	11.356	11.488	24,132	12.65%
1000-2000	1.189	14.151	14.201	26,867	14.09%
>2000	2.298	15.508	15.677	23,659	12.41%

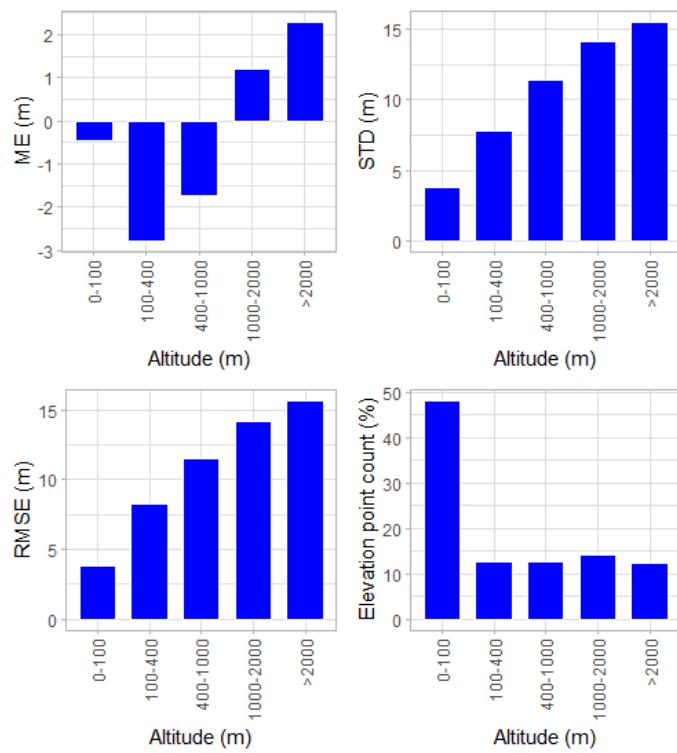


圖 30 ICESat-2 海拔高度之高程誤差敘述統計圖

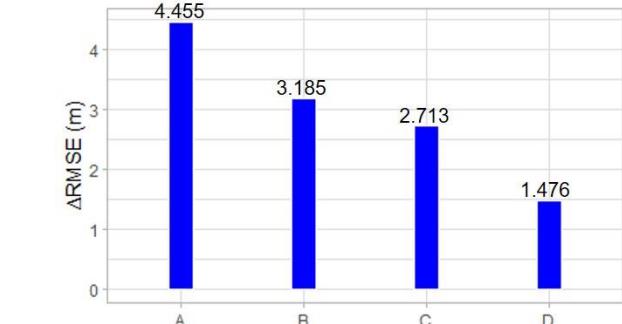
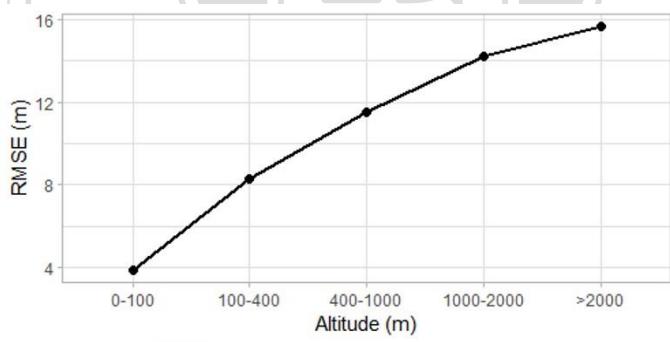


圖 31 ICESat-2 海拔高度之高程誤差增加幅度圖

第二節 鄉鎮市區單元特性分析

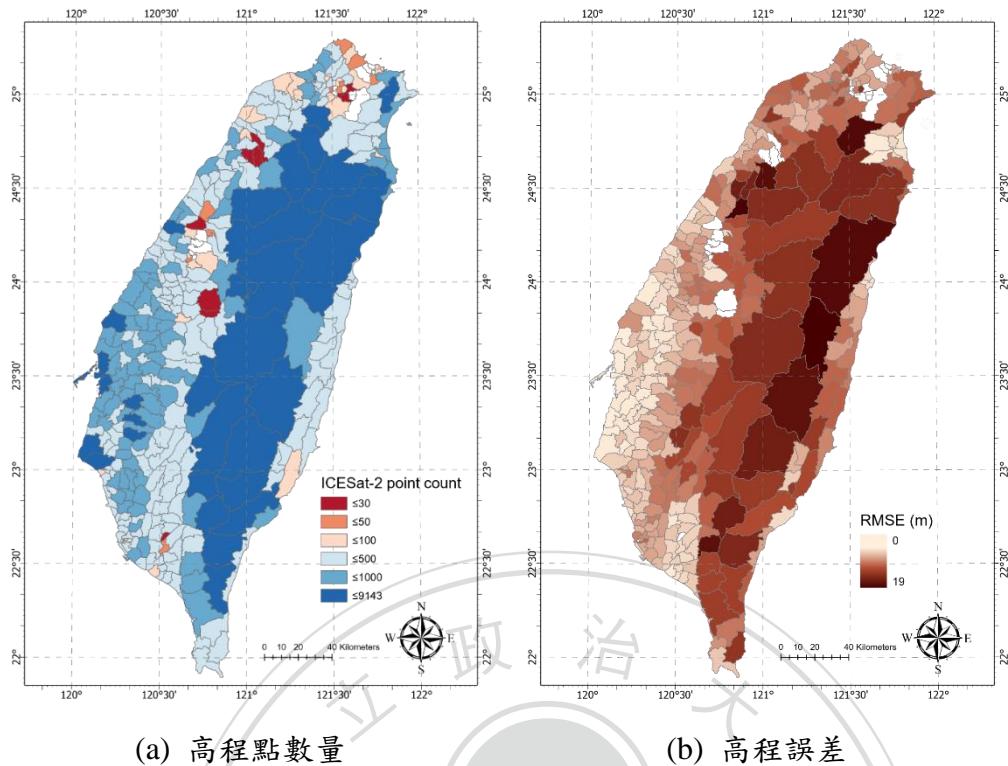
DEM 習慣以行政區進行劃分以供使用與查找，因而本節以鄉鎮市區單元為空間單元進行分析，進一步分析 ICESat-2 ATL08 地形高程於本研究區域之特性，用以提供 ICESat-2 ATL08 地形高程之實用性。

一、誤差與各因子分布狀況

台灣本島共有 349 個鄉鎮市區單元，其中 333 個鄉鎮市區單元內具 ICESat-2 高程點，以此 333 個鄉鎮市區單元進行後續分析。

由於各鄉鎮市區中 ICESat-2 高程點數量皆不相同，為了能夠有效的評估 ICESat-2 高程誤差的表現，因而以統計上建議至少 30 個樣本(Roscoe, 1975)為門檻值進行篩選，過濾高程點數量不足之單元。

各鄉鎮市區單元內之 ICESat-2 高程點數量如圖 32(a)所示，333 個鄉鎮市區單元中有少部分(9 個)鄉鎮市區內之高程點數量少於門檻值 30 個高程點，佔比約研究範圍之 3%，而多數鄉鎮市區單元內的高程點數量大於 100 個高程點。為了能有效評估其高程誤差之表現，因而將該 9 個未達門檻值要求之鄉鎮市區單元移除，後續分析以剩餘之 324 個鄉鎮市區單元進行分析。經計算後，各鄉鎮市區單元之高程誤差呈現於圖 32(b)，西半部區域之鄉鎮市區單元高程誤差較小，越靠近中部山區之鄉鎮市區單元則有誤差越大之趨勢。



(a) 高程點數量

(b) 高程誤差

圖 32 鄉鎮市區單元之高程點數量、高程誤差分布圖

為進一步觀察影響鄉鎮市區單元內地形高程誤差之原因，基於前節之分析，進而以土地覆蓋類別、坡度與海拔高度等因子針對鄉鎮市區單元之地形高程誤差進行分析，用以了解此三種影響因子對於鄉鎮市區單元地形高程誤差之影響。各鄉鎮市區單元內之土地覆蓋類別以單元內土地覆蓋面積最大之類別為代表，坡度以單元內平均坡度為代表，海拔高度亦以單元內平均海拔高度為代表，分別如圖 33(a), (b), (c)所示。

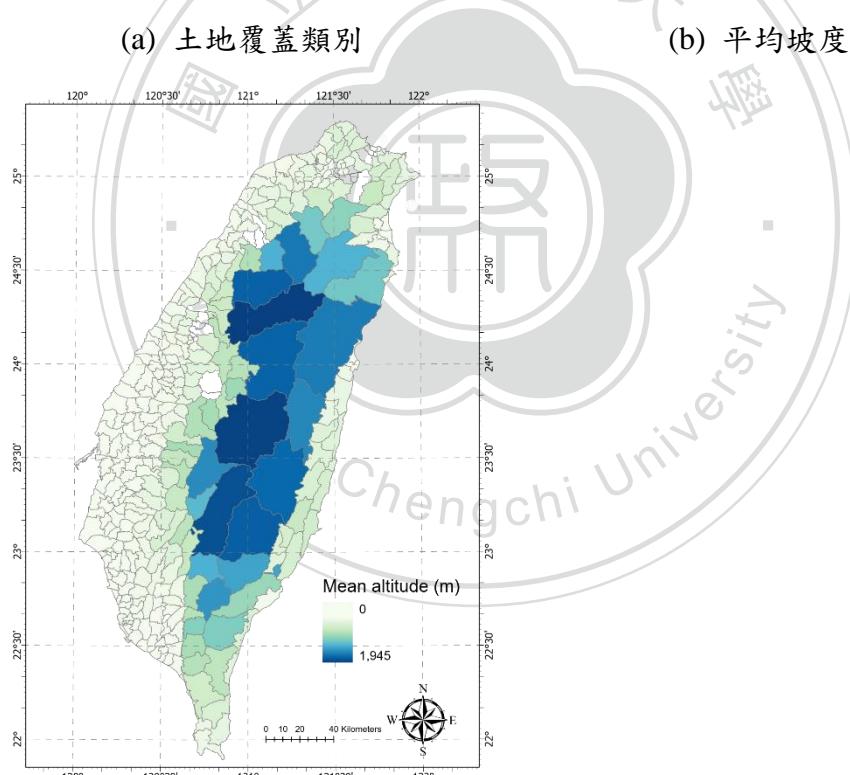
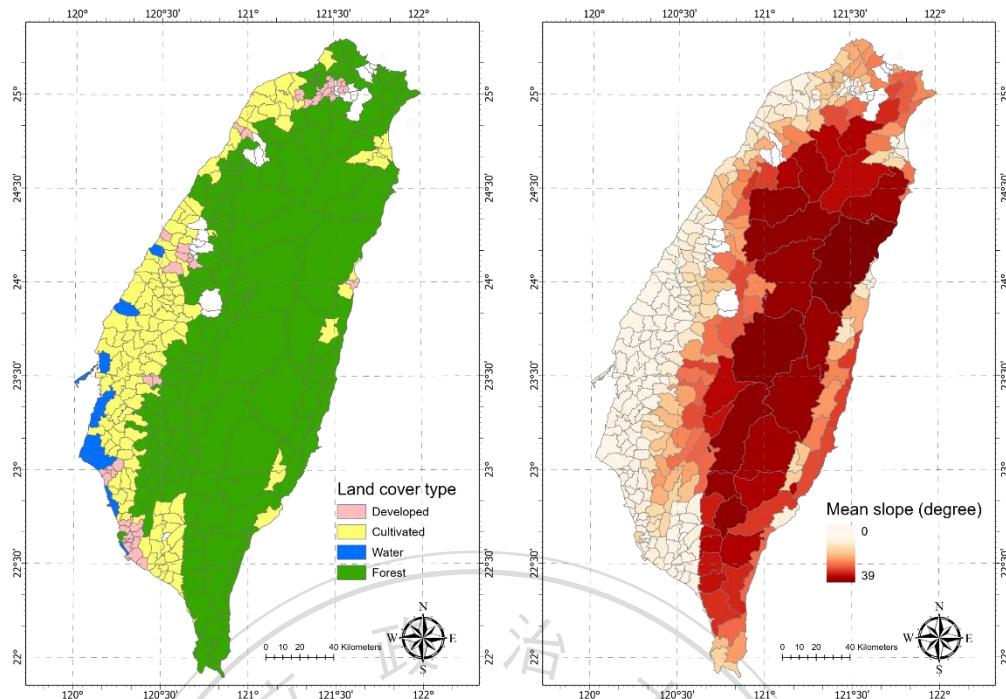


圖 33 鄉鎮市區單元之影響因子分布圖

經由各項影響因子與高程誤差間之散布圖觀察兩者間之關係，高程誤差與平均坡度之關係如圖 34，並將土地覆蓋類別以不同顏色表示，一同併入討論。整體散布圖中，最大平均坡度約 40° ，對應之高程誤差約 20 公尺，高程誤差整體上呈現隨平均坡度之增加而上升的現象。

各鄉鎮市區單元之高程誤差與平均海拔高度之關係如圖 35 所示，整體散布圖中，最大平均海拔高度約 2000 公尺，對應之高程誤差約分布於 10 至 15 公尺，鄉鎮市區單元之平均海拔高度大多聚集於 500 公尺以下，高程誤差亦隨著平均海拔高度之增加而上升，然於平均海拔高度達約 500 公尺時高程誤差增加之幅度趨於平緩，於高平均海拔處的高程誤差較無明顯變化之現象。

此外，由圖 34 與圖 35 可看出各種土地覆蓋類別下的高程誤差分布範圍有所不同，約可以平均坡度 10° 將鄉鎮市區單元劃分為林地與非林地，由分布上判斷林地的高程誤差較大，高程誤差約分布於 5 至 20 公尺，非林地中以水源地之高程誤差最小，主要分布於高程誤差 5 公尺以下，而建成地與耕作地之分布相近，高程誤差分布於 10 公尺以下，而於平均海拔高度中，由於各種土地覆蓋類別較密集分布於 500 公尺以下之海拔高度，因而較難以平均海拔高度將不同土地覆蓋類別的高程誤差進行劃分。

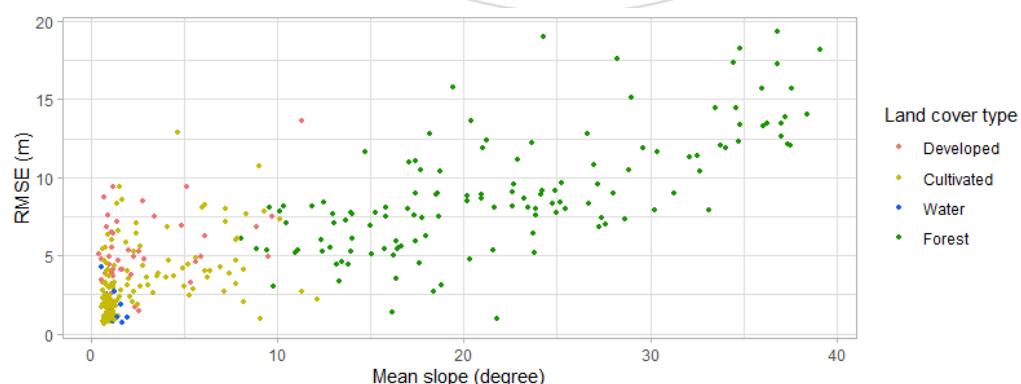


圖 34 鄉鎮市區單元之高程誤差與平均坡度散布圖

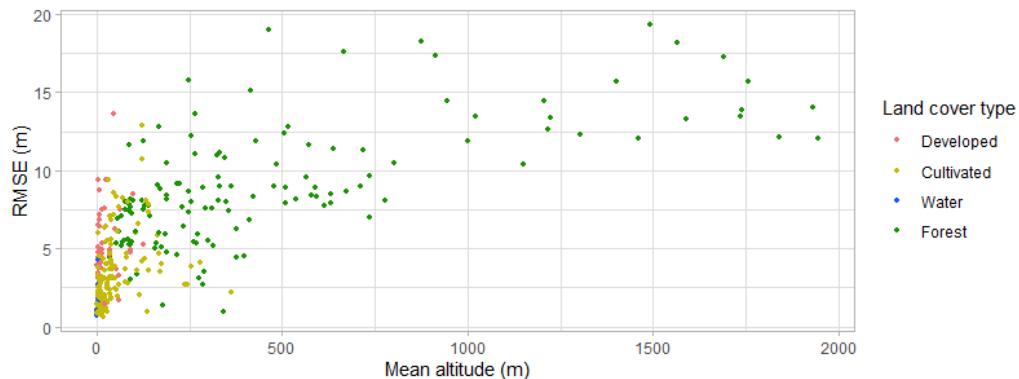
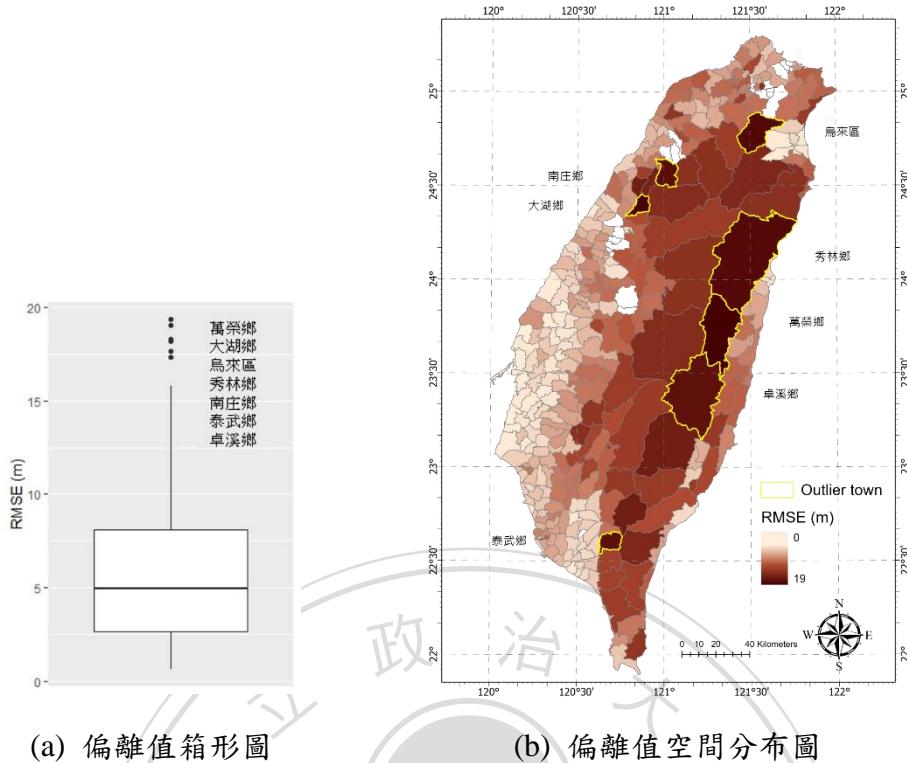


圖 35 鄉鎮市區單元之高程誤差與平均海拔高度散布圖

由圖 34 與圖 35 可知鄉鎮市區單元與土地覆蓋類別、坡度及海拔高度間之整體關係，然而欲進一步了解其趨勢則需考慮移除高程誤差屬於偏離值(Outlier)之鄉鎮市區單元，因而於下一部份探討造成高程誤差偏離值之原因，並將其移除，最後針對各影響因子與高程誤差間之趨勢關係進行分析。

二、誤差趨勢分析

由於偏離值與其他觀察值存在差異，兩者為不同機制所產生(Aggarwal, 2015)，在觀察資料趨勢時，應將偏離值予以移除。依據 Tukey(1977)所提出的箱形圖可以概要式(Schematic)的方法反映資料中是否有偏離值(Outlier)(譚克平, 2007)，由圖 36(a)可知共有七個鄉鎮市區單元屬於高程誤差之偏離值，約佔整體數量之 2.1%，由圖 36(b)可發現偏離值大多為中部山區，且秀林鄉、萬榮鄉及卓溪鄉在空間上明顯聚集。



(a) 偏離值箱形圖 (b) 偏離值空間分布圖

圖 36 鄉鎮市區單元之偏離值箱形圖、偏離值空間分布圖

為了瞭解特定鄉鎮市區單元之高程誤差成為偏離值之原因，因而將偏離值標註於高程誤差與各影響因子之散布圖中，由各因子與高程誤差之散布圖分布來分析造成偏離值之原因。

由圖 37 可了解偏離值大多為平均坡度較陡峭之鄉鎮市區單元，平均坡度約大於 25° 始有偏離值出現，且於平均坡度大於 35° 之處有明顯聚集，表示坡度對於高程誤差具有明顯影響。相較於平均海拔高度而言，由圖 38 可發現偏離值分散於各種平均海拔高度中，並無明顯聚集處，因而表示對於偏離值而言，平均海拔高度較無明顯影響。此外，與圖 34 與圖 35 相比，可知偏離值之主要土地覆蓋類別皆為林地，亦表示林地對於高程誤差的影響相較於他種土地覆蓋類別而言具有更大的誤差，此結論與前節土地覆蓋類別與高程誤差分析之結論相互呼應。

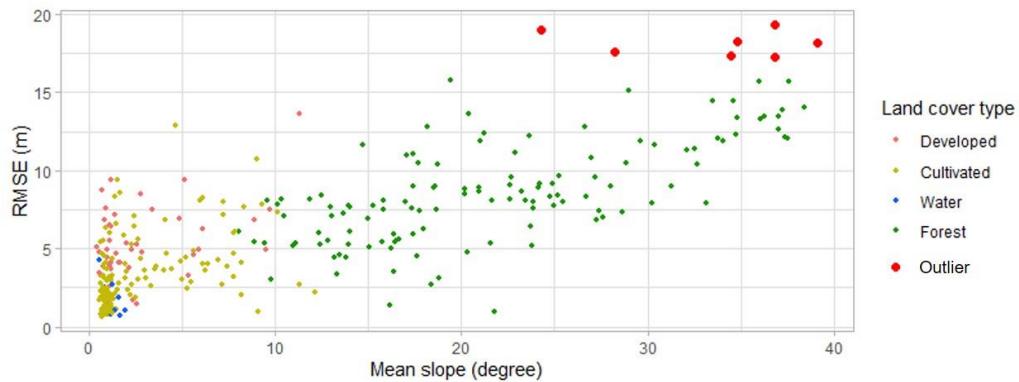


圖 37 鄉鎮市區單元之高程誤差與平均坡度散布圖(標註偏離值)

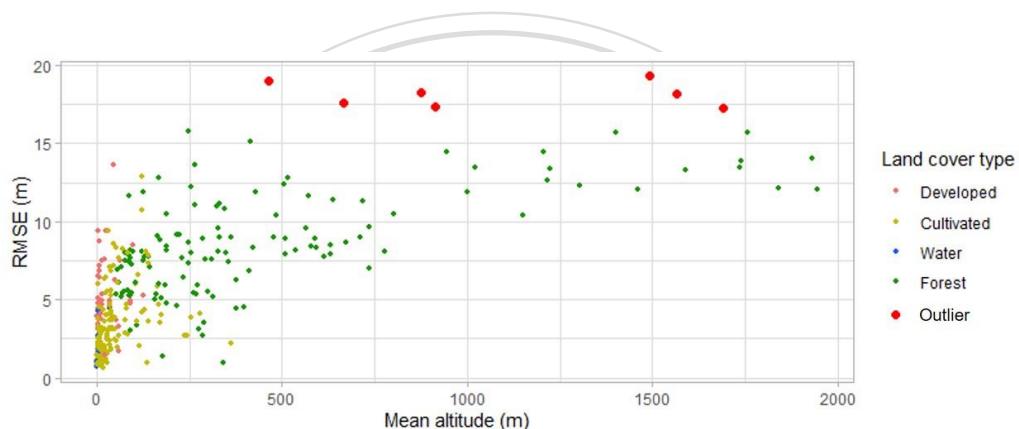


圖 38 鄉鎮市區單元之高程誤差與平均海拔高度散布圖(標註偏離值)

本研究欲觀察鄉鎮市區單元於各影響因子下之誤差趨勢，故經由移除屬於高程誤差偏離值的鄉鎮市區單元後，以 Cleveland (1979)所提出之局部加權迴歸散布圖平滑法 LOWESS 表示資料上之趨勢。

圖 39 為各鄉鎮市區單元地形高程誤差與平均坡度移除高程誤差偏離值後之散布圖，並以 LOWESS 平滑法標示高程誤差之趨勢，鄉鎮市區單元之平均坡度與高程誤差呈現正向關係，高程誤差隨平均坡度由平緩至陡峭而增加，且誤差趨勢線呈現持續上升的現象。

圖 40 為各鄉鎮市區單元地形高程誤差與平均海拔高度移除高程誤差偏離值後之散布圖，高程誤差之趨勢同平均坡度之狀況，隨平均海拔高度

之增加而使高程誤差提升；然亦有不同之處，高程誤差與平均海拔高度之趨勢具有明顯轉折處，轉折處約位於平均海拔高度 125 至 250 公尺處，平均海拔高度低於轉折處之高程誤差趨勢較陡，高程誤差變大之趨勢較明顯，而平均海拔高度高於轉折處之高程誤差趨勢則較為平緩，且於 1500 公尺以上的誤差趨勢幾乎呈現平坦狀態，顯示平均海拔高度於不同高度下對於高程誤差具有不同程度之影響效果。

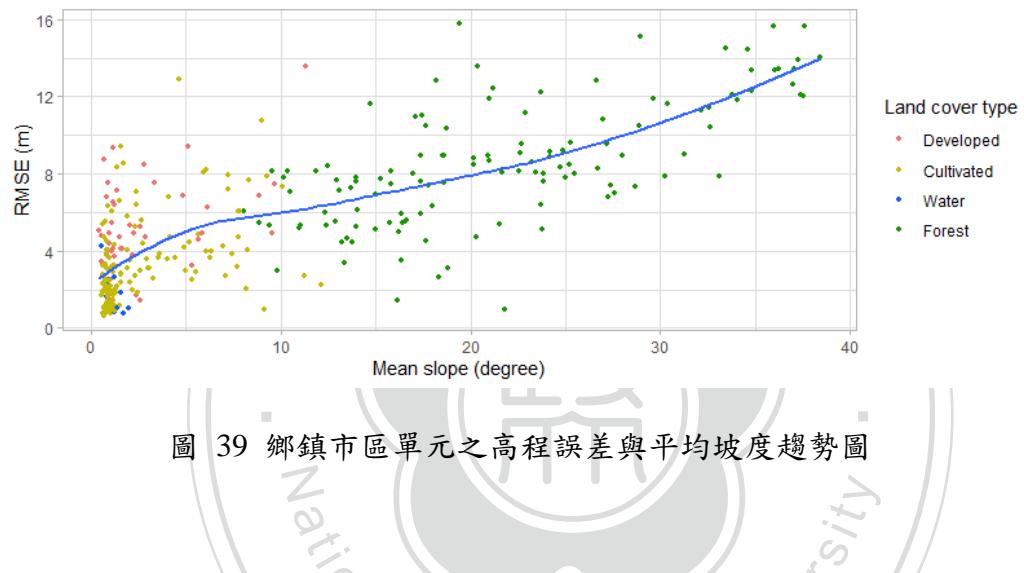


圖 39 鄉鎮市區單元之高程誤差與平均坡度趨勢圖

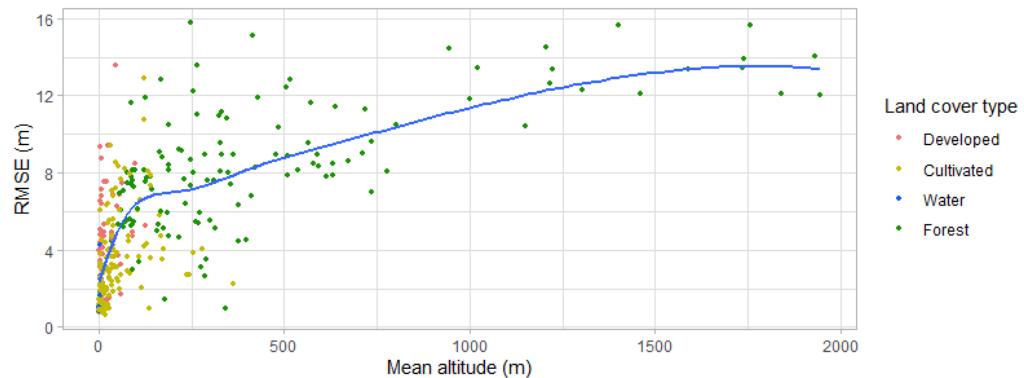


圖 40 鄉鎮市區單元之高程誤差與平均海拔高度趨勢圖

第三節 比例尺五千分之一圖框單元特性分析

基本地形圖比例尺五千分之一圖框為內政部 DEM 圖幅查詢與套疊之基準，且其亦適用於「臺灣通用電子地圖」、「國土利用現況調查」及「正射影像」圖幅查詢套疊，基於前節之基礎，本節以比例尺五千分之一圖框為空間單元，進一步以更細緻的空間單元來分析 ICESat-2 ATL08 地形高程特性並增加其實用性。

一、誤差與各因子分布狀況

比例尺五千分之一圖框於台灣本島上共有 5436 個圖框單元，其中有 3937 個圖框單元具有 ICESat-2 高程點，為了能夠有效的評估 ICESat-2 高程誤差的表現，因此針對空間單元內高程點數量進行篩選，篩選方式同前節，以統計上要求之 30 個樣本點為門檻值對圖框單元進行篩選。

各圖框單元內之 ICESat-2 高程點數量如圖 41 所示，其中 1534 個圖框單元內之 ICESat-2 高程點數量少於門檻值之要求，佔比約整體之 39%。為了能有效評估其高程誤差的表現，因而將單元內少於 30 個高程點之圖框移除，剩餘圖框單元共 2403 個圖框，如圖 42(a)所示，而剩餘圖框單元的高程點數量大多介於 30 至 100 個高程點。經計算後，各圖框單元之高程誤差呈現於圖 42(b)，西半部區域之圖框單元高程誤差較小，中部山區之圖框單元則誤差較大。

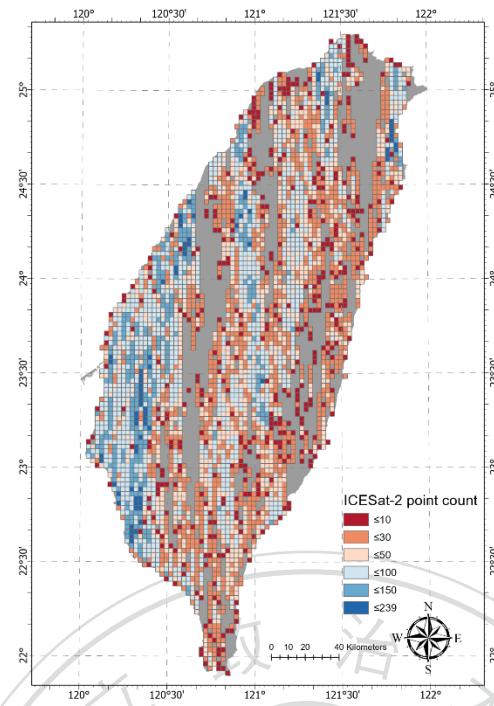


圖 41 圖框單元之高程點數量分布圖(全)

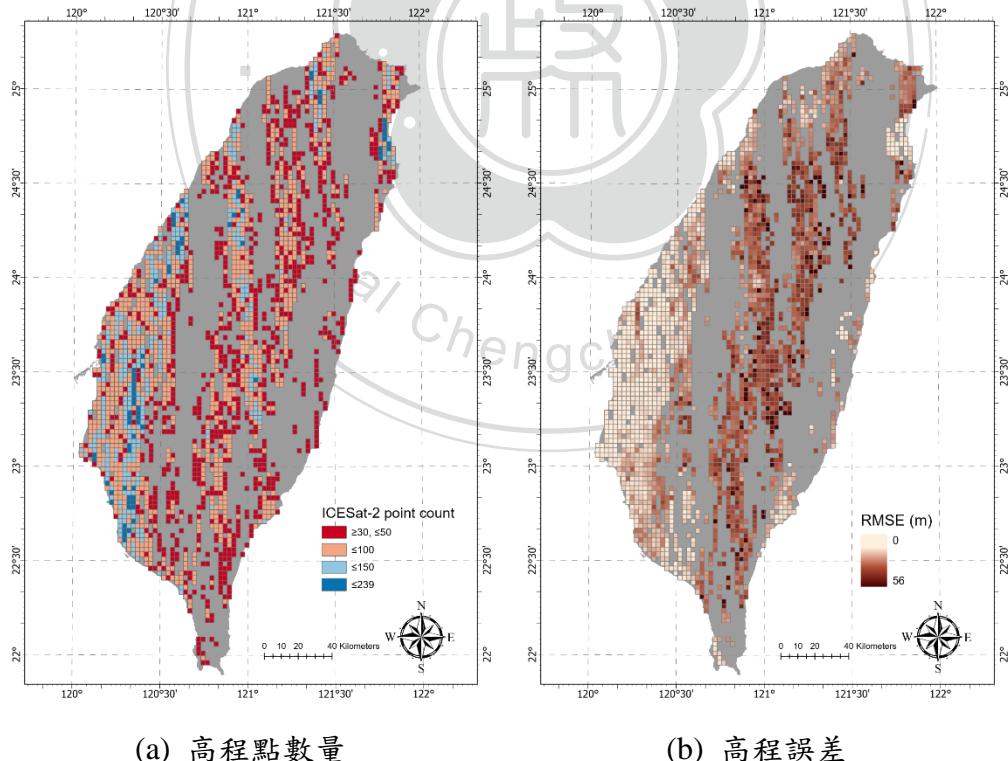
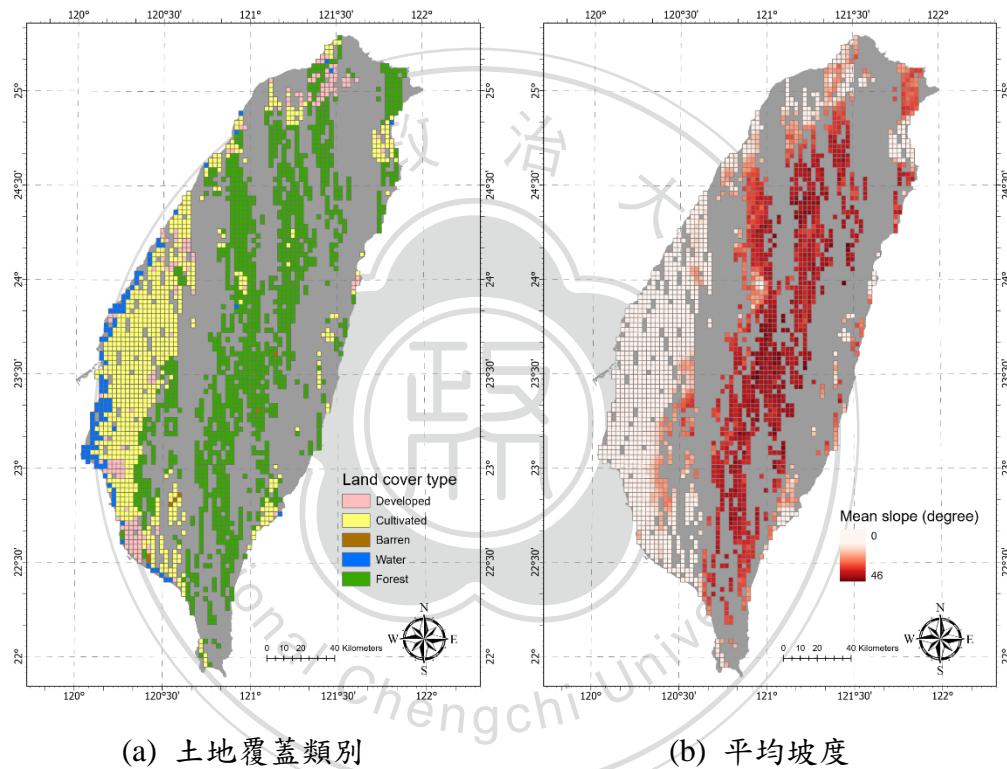
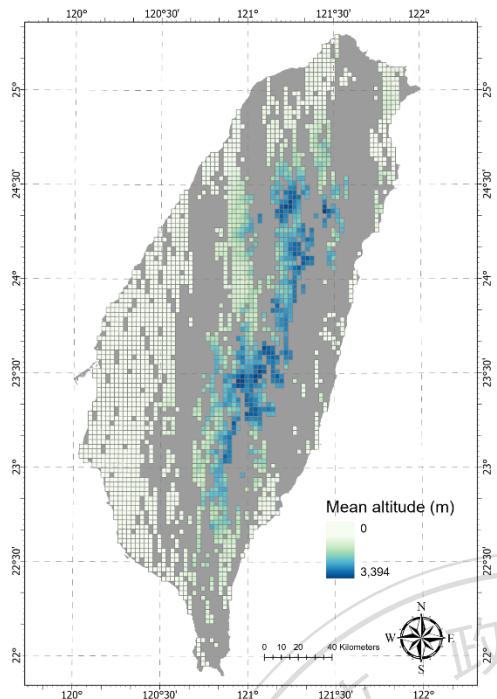


圖 42 圖框單元之高程點數量、高程誤差分布圖

為進一步觀察影響圖框單元內地形高程誤差之原因，基於前節之分析，進而以土地覆蓋類別、坡度與海拔高度等因子針對圖框單元之地形高程誤差進行分析，用以了解此三種影響因子對於圖框單元地形高程誤差之影響。各圖框單元內之土地覆蓋類別以單元內土地覆蓋面積最大之類別為代表，坡度以單元內平均坡度為代表，海拔高度亦以單元內平均海拔高度為代表，分別如圖 43(a), (b), (c)所示。





(c) 平均海拔高度

圖 43 圖框單元之影響因子分布圖

經由各項影響因子與高程誤差間之散布圖觀察兩者間之關係，高程誤差與平均坡度之關係如圖 44，並將土地覆蓋類別以不同顏色表示一同併入討論。整體散布圖中，最大平均坡度約 45° ，對應之高程誤差約介於 10 至 40 公尺間，高程誤差整體上呈現隨平均坡度之增加而上升的現象。

各圖框單元之高程誤差與平均海拔高度之關係如圖 45 所示，整體散布圖中，最大平均海拔高度約 3500 公尺，對應之高程誤差約介於 10 公尺左右，圖框單元之平均海拔高度大多聚集於 500 公尺以下，高程誤差同樣也存在隨著平均海拔高度之增加而上升的現象，然於平均海拔高度達約 500 公尺時高程誤差增加之幅度趨於平緩，於高平均海拔處的高程誤差較無明顯變化現象。

此外，林地與非林地之分布範圍有所不同，約可以平均坡度 10° 將圖框單元劃分為林地與非林地，由分布上判斷林地的高程誤差較大，而於平均

海拔高度中，由於各種土地覆蓋類別較密集分布於 500 公尺以下之海拔高度，因而較難以平均海拔高度將不同土地覆蓋類別的高程誤差進行劃分。

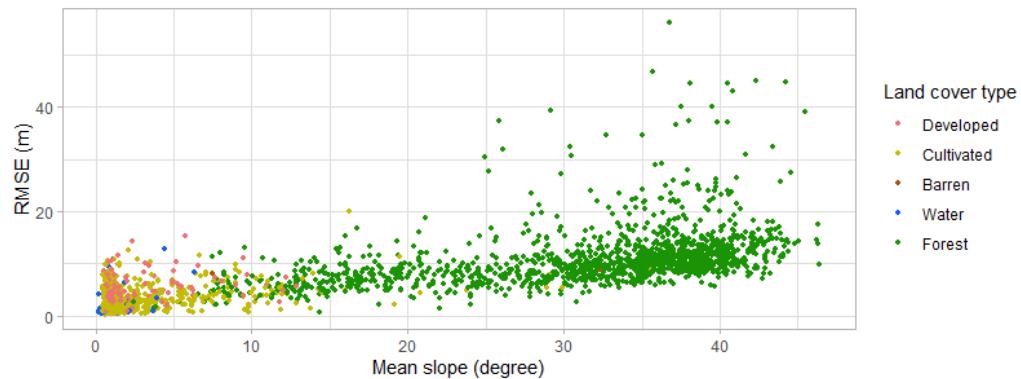


圖 44 圖框單元之高程誤差與平均坡度散布圖

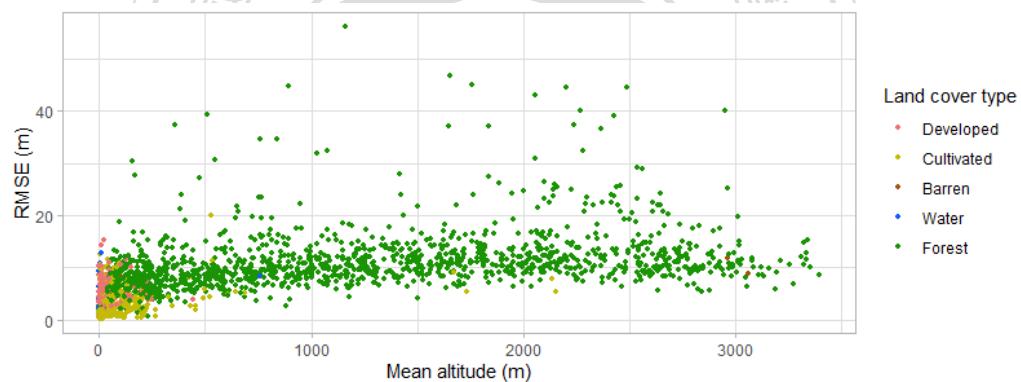


圖 45 圖框單元之高程誤差與平均海拔高度散布圖

由圖 44 與圖 45 可知圖框單元與土地覆蓋類別、坡度、海拔高度間之整體關係，然而欲進一步了解其趨勢則需考慮移除高程誤差屬於偏離值之圖框單元，因而於下一部份探討造成高程誤差偏離值之原因，並將其移除，最後針對各影響因子與高程誤差間之趨勢關係進行分析。

二、誤差趨勢分析

依據 Tukey(1997)所提出的概要式箱形圖呈現資料中是否有偏離值，如圖 46(a)，並將偏離值之空間位置呈現於圖 46(b)中，由圖 46(b)可發現偏離值大多位於中部山區區域，而偏離值數量約佔總體數量之 2%。

為了瞭解特定圖框單元之高程誤差成為偏離值之原因，因而將偏離值標註於高程誤差與各影響因子之散布圖中，由各因子與高程誤差之散布圖分布來分析造成偏離值之原因。

由圖 47 可了解偏離值大多為平均坡度較陡峭之圖框單元，平均坡度大於 25° 始有偏離值出現，且於平均坡度大於 35° 之處有明顯聚集，表示坡度對於高程誤差具有明顯影響。相較於平均海拔高度而言，由圖 48 可發現偏離值分散於各種平均海拔高度中，並無明顯聚集處，因而表示對於偏離值而言，平均海拔高度較無明顯影響。此外，與圖 44 與圖 45 相比，可知偏離值之主要土地覆蓋類別皆為林地，亦表示林地對於高程誤差的影響相較於他種土地覆蓋類別而言具有更大的誤差，此結論與前兩節土地覆蓋類別與高程誤差分析之結論相互呼應。

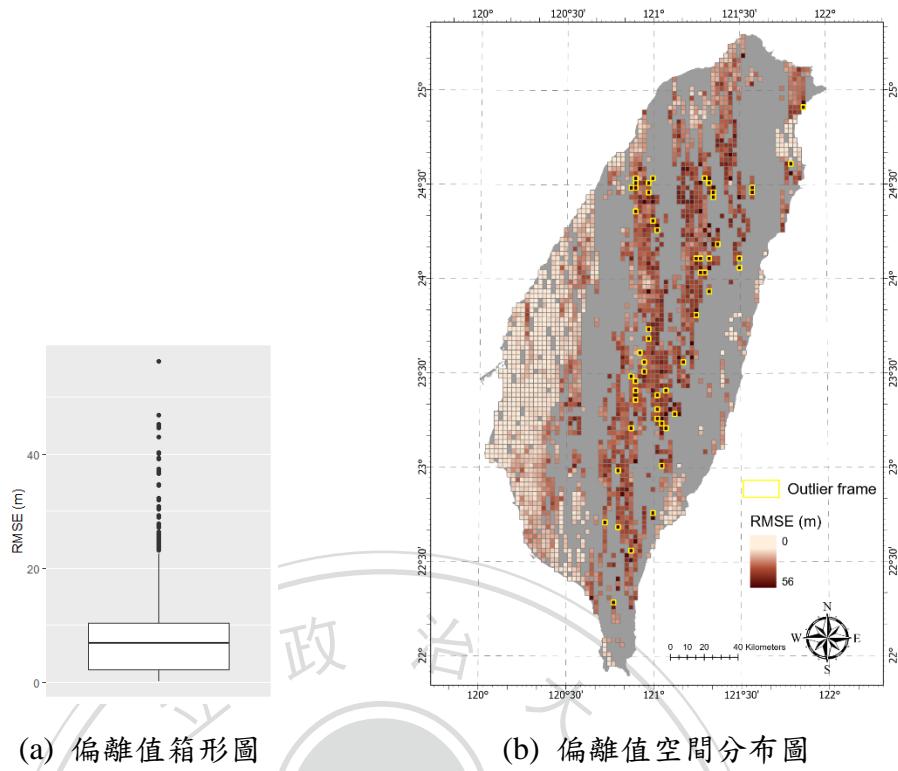


圖 46 圖框單元之偏離值箱形圖、偏離值空間分布圖

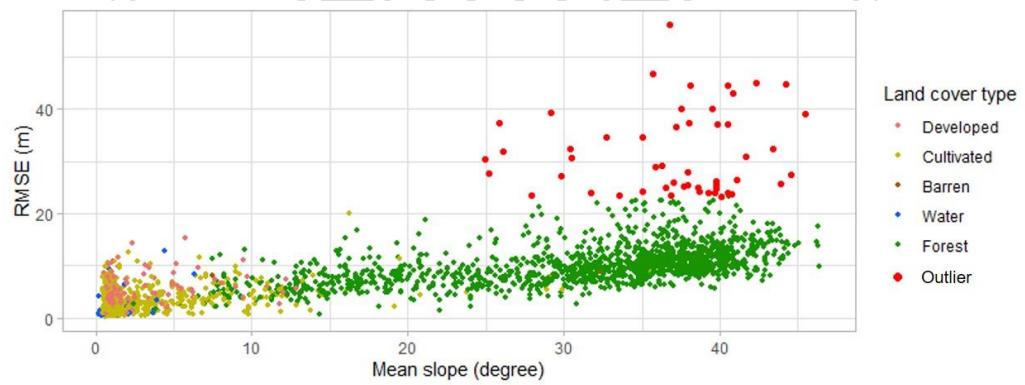


圖 47 圖框單元之高程誤差與平均坡度散布圖(標註偏離值)

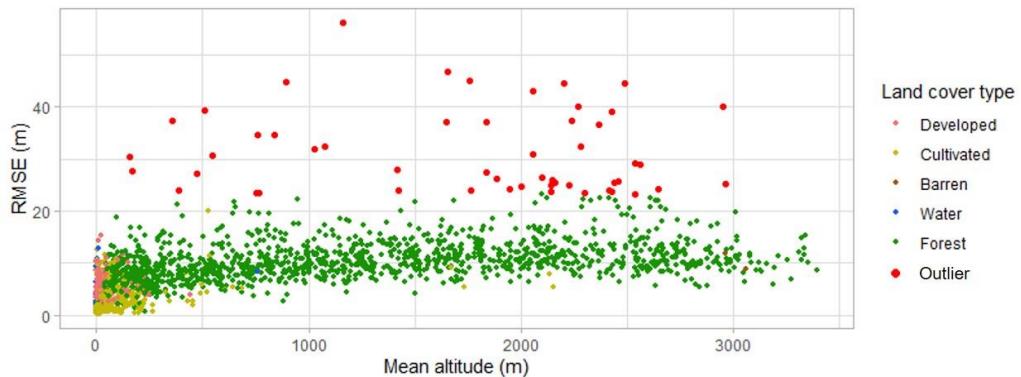


圖 48 圖框單元之高程誤差與平均海拔高度散布圖(標註偏離值)

經由移除屬於高程誤差偏離值的圖框單元後，觀察圖框單元於各影響因子下之誤差趨勢，本研究以 Cleveland (1979)所提出之局部加權迴歸散布圖平滑法 LOWESS 表示資料上之趨勢。

圖 49 為各圖框單元地形高程誤差與平均坡度移除高程誤差偏離值後之散布圖，並以 LOWESS 平滑法標示高程誤差之趨勢，圖框單元之平均坡度與高程誤差呈現正向關係，高程誤差隨平均坡度由平緩至陡峭而增加，且誤差趨勢線呈現持續上升的現象。此外，由散布圖可觀察到圖框單元的分布有兩處聚集處，一處為平均坡度約低於 3° 、高程誤差約低於 5 公尺以下，此處聚集以建成地、耕作地與水源地聚集於此範圍，另一處聚集處位於平均坡度約介於 30° 至 40° 、高程誤差約 5 公尺至 15 公尺處，且主要為林地聚集於此範圍。

圖 51 為各圖框單元地形高程誤差與平均海拔高度移除高程誤差偏離值後之散布圖，並以 LOWESS 平滑法標示高程誤差之趨勢，高程誤差之趨勢同平均坡度之狀況，隨平均海拔高度之增加而使高程誤差提升；然亦有不同之處，高程誤差與平均海拔高度之趨勢具有明顯轉折處，轉折處於平均海拔高度約 250 公尺處，平均海拔高度低於轉折處之高程誤差趨勢較陡，高程誤差變大之趨勢較明顯，而平均海拔高度高於轉折處之高程誤

差趨勢則較為平緩，且於 1500 公尺以上的誤差趨勢幾乎呈現平坦狀態，顯示平均海拔高度於不同高度下對於高程誤差具有不同程度之影響效果。

由圖 50 與圖 52 可知不同土地覆蓋類別在平均坡度與平均海拔高度兩影響因子下與高程誤差分布之差異，高程誤差分布上以水源地之高程誤差最小，主要分布於誤差 2 公尺以下，其次依序為耕作地、建成地、林地；裸露地因圖框單元較少故不列入討論；耕作地與建成地高程誤差分布相似，皆分布於誤差 10 公尺以下，然耕作地的分布較建成地密集分布於 2 公尺以下；高程誤差最大者為林地，誤差約分布於 5 至 25 公尺間。

不同影響因子對於土地覆蓋類別之高程誤差影響上，以平均坡度而言，平均坡度對於高程誤差的影響以林地較為明顯，隨平均坡度之增加，林地的高程誤差有較明顯的增加；以平均海拔高度而言，平均海拔高度的增加對於高程誤差的影響於不同土地覆蓋類別而言較不明顯，各土地覆蓋類別的高程誤差並無明顯隨海拔高度之增加而增加。

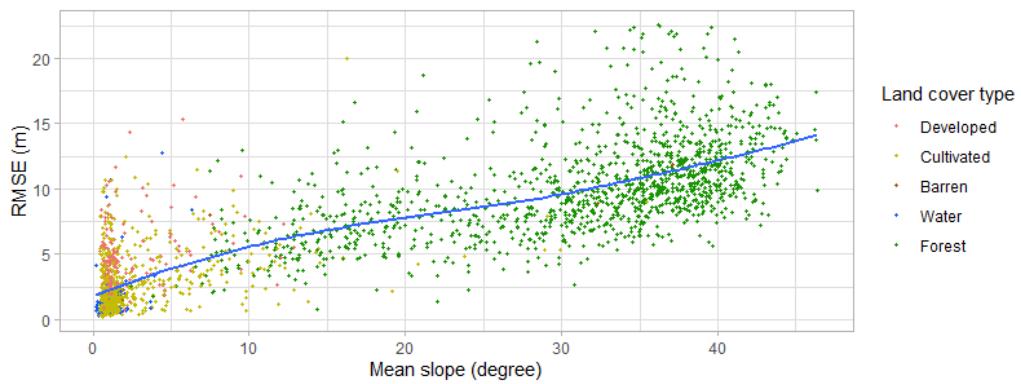


圖 49 圖框單元之高程誤差與平均坡度趨勢圖

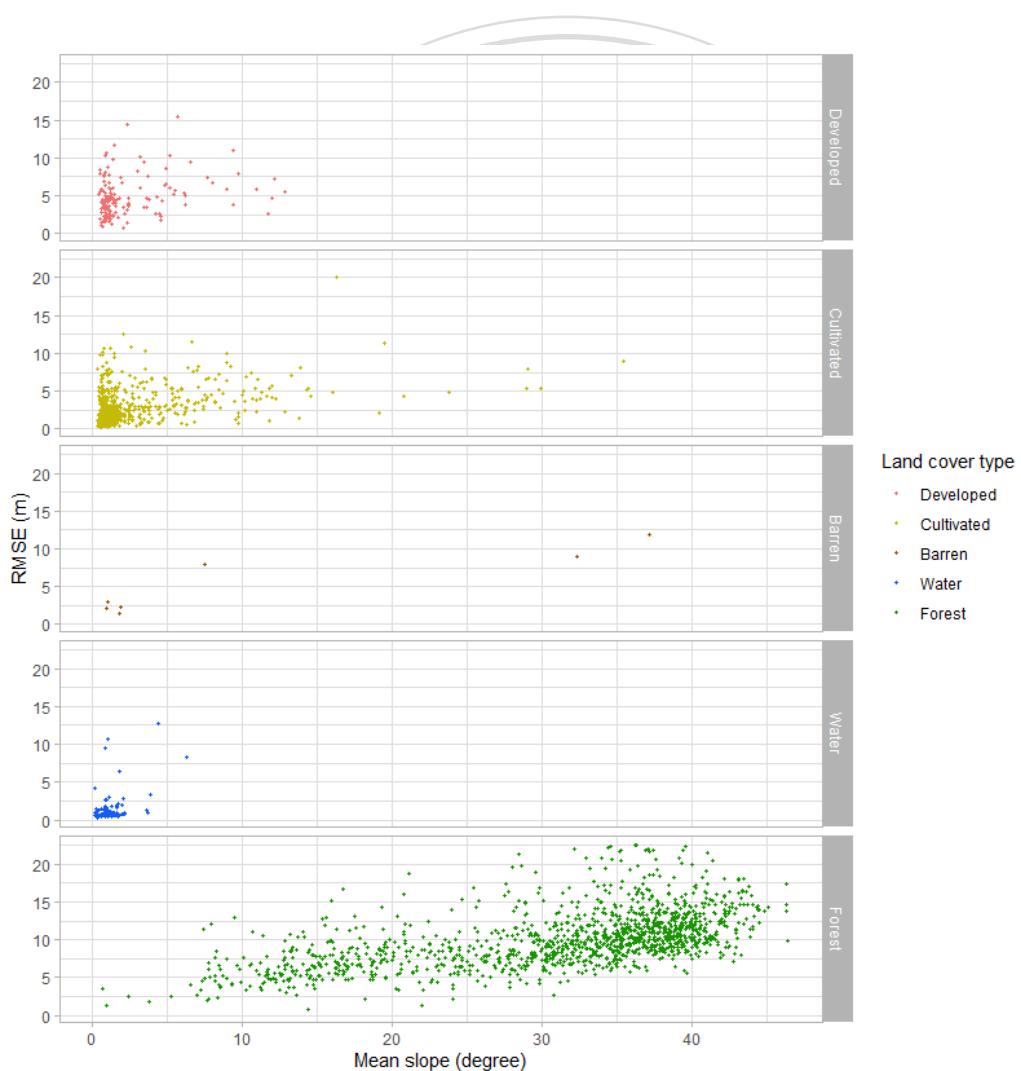


圖 50 圖框單元之高程誤差與平均坡度趨勢散布圖(依土地覆蓋類別劃分)

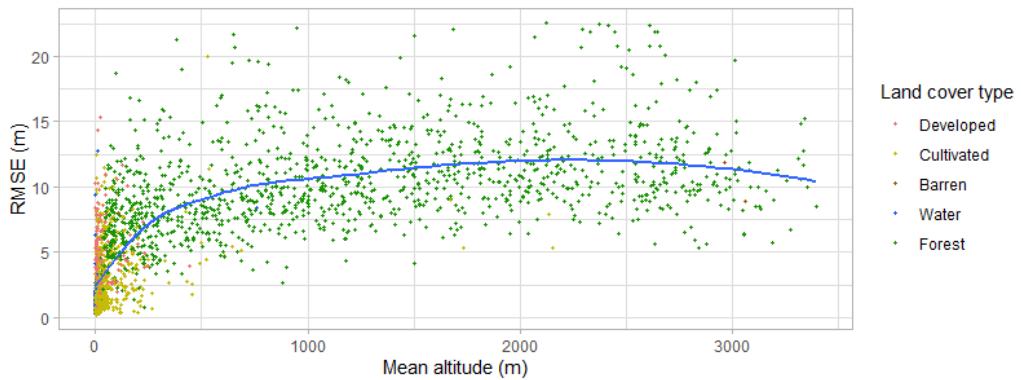


圖 51 圖框單元之高程誤差與平均海拔高度趨勢圖

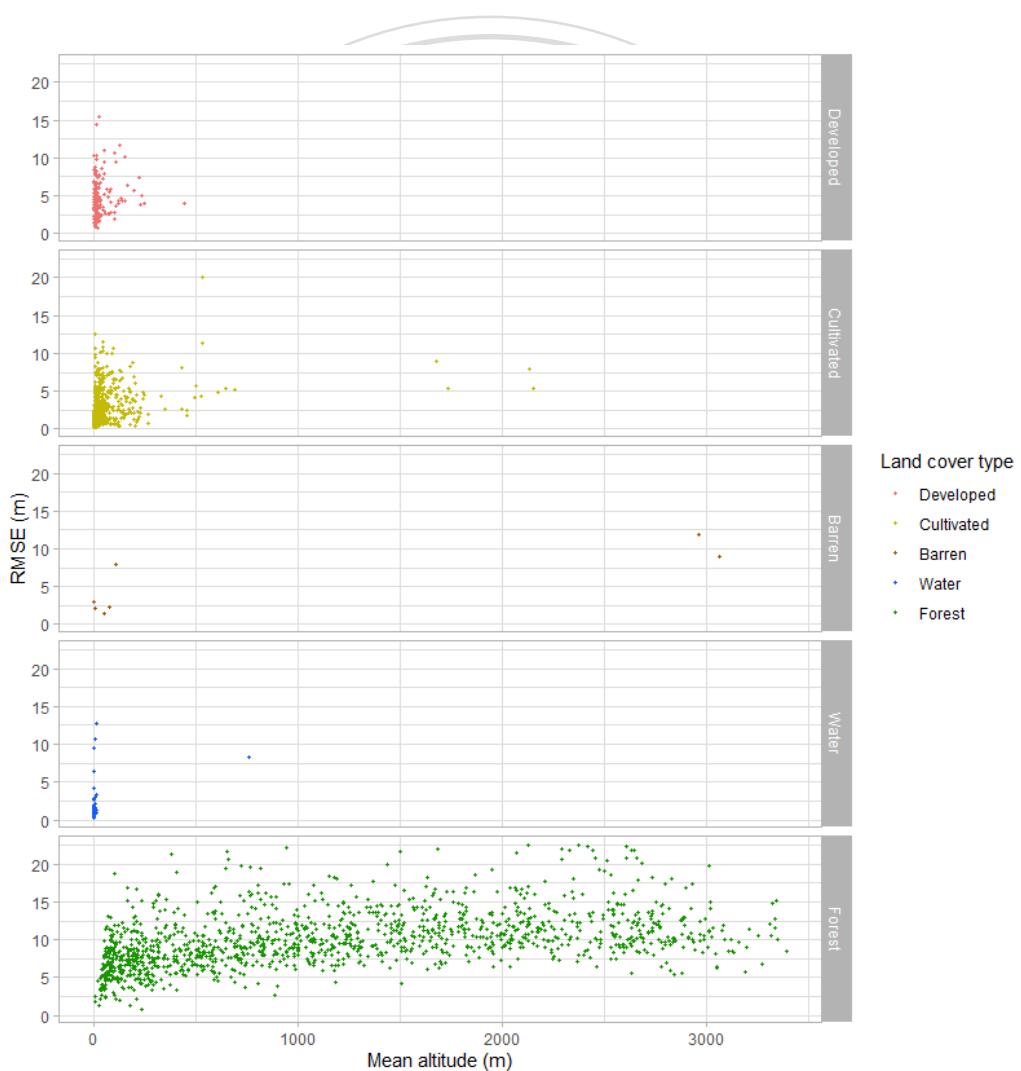


圖 52 圖框單元之高程誤差與平均海拔高度趨勢散佈圖(依土地覆蓋類別
劃分)

第四節 ICESat-2 地形高程特性統整

前三節分別以本研究區域中所有 ICESat-2 ATL08 地形高程點、鄉鎮市區單元及比例尺五千分之一圖框單元此三種不同空間單元分析 ICESat-2 ATL08 地形高程於土地覆蓋類別、坡度及海拔高度三種影響因子下的特性，本節將綜合前三節分析之成果，綜整討論各影響因子於本研究區域之高程特性。

首先，就土地覆蓋影響因子而言，五種土地覆蓋類別中，僅建成地具有約 0.92 公尺之正偏差，表示其未能完全移除地上構造物所造成之高程影響。以研究範圍中所有高程點計算五種土地覆蓋類別的高程誤差，以水源地之高程誤差最小，其次依序為耕作地、建成地、裸露地及林地；於鄉鎮市區單元與圖框單元中，土地覆蓋類別與高程誤差的分布上也大致符合此排序，水源地之高程誤差約分布於 5 公尺以下，建成地與耕作地之高程誤差分布於 10 公尺以下，林地之高程誤差分布較廣，約分布於 5 至 20 公尺間。由三種不同空間單元來分析土地覆蓋類別對於高程誤差的影響，其所得之成果相互呼應，不因空間單元不同而相悖。此外，林地為土地覆蓋類別中高程誤差最大者，亦反映於鄉鎮市區單元與圖框單元的高程誤差偏離值中，兩種空間單元下之高程誤差偏離值土地覆蓋類別皆為林地，而無非林地存在，亦表示林地的高程誤差於五種土地覆蓋類別中為誤差較大者。

就坡度影響因子而言，研究範圍中所有高程點計算出之高程誤差隨坡度分級的增加而上升，而在鄉鎮市區單元與圖框單元中，坡度對於高程誤差的趨勢皆呈現正向關係，趨勢線隨平均坡度的增加而持續上升。由三種不同空間單元來分析坡度對於高程誤差的影響，高程誤差皆呈現隨坡度增加而上升的現象，表示就本研究區域而言，坡度對於高程誤差確實有影響。以高程點計算不同坡度分級下的高程誤差增加幅度，指出誤差增加幅度隨

坡度的增加由高幅度逐漸下降，誤差增加幅度又於坡度分級最大時上升，此現象於鄉鎮市區單元的趨勢線中僅可由趨勢線上的略微差異做判斷，然而並無明顯隨坡度之增加而有誤差增加幅度不同的差異，於圖框單元中亦如此。

就海拔高度影響因子而言，研究範圍中所有高程點計算出之高程誤差隨海拔高度分級的增加而上升，然而高程誤差增加的幅度隨海拔高度的增加而下降，表示高程誤差於低海拔高度區域較容易受到海拔高度增加的影響而使高程誤差上升，而在高海拔區域時則較不受海拔高度增加的影響；於鄉鎮市區單元與圖框單元中，平均海拔高度對於高程誤差的趨勢也可看出此現象，低於趨勢轉折處的低海拔高度單元對於海拔高度的增加較為敏感，於高程誤差的趨勢上呈現較陡的趨勢線，隨著海拔高度的增加，趨勢線則趨於平緩。由三種不同空間單元來分析海拔高度對於高程誤差的影響，其所得之成果亦相互呼應，不因空間單元不同而相悖，皆表示高程誤差於低海拔高度下較易受海拔高度增加的影響，而高海拔高度下則較不受影響。

此外，以土地覆蓋類別中誤差最大之林地進行因子間之分析，觀察以高程點為單元計算之林地高程誤差於不同坡度及海拔高度下的表現。本章第一節之成果指出研究範圍內之林地高程誤差為 13.009 公尺，然由表 11 與表 12 可見於特定坡度及海拔高度時，林地亦可有較佳的高程誤差表現，當坡度小於 15° 與海拔高度低於 400 公尺時，林地之高程誤差皆低於 10 公尺，亦表示並非所有林地之高程誤差表現皆不佳。

表 11 林地之高程誤差敘述統計表(依坡度劃分)

Slope(°)	ME	SD	RMSE	Elevation point	
				Count	Ratio
0-5	-1.559	4.702	4.953	4,180	4.62%
5-10	-2.305	7.203	7.562	3,778	4.18%
10-15	-2.290	9.410	9.684	5,005	5.53%
15-20	-2.064	10.382	10.584	6,435	7.11%
20-25	-1.396	11.126	11.212	8,441	9.33%
25-30	-0.434	11.879	11.887	10,332	11.42%
30-35	0.271	12.526	12.528	12,430	13.74%
35-40	0.819	13.235	13.260	13,810	15.27%
40-80	0.803	16.254	16.274	26,056	28.80%

表 12 林地之高程誤差敘述統計表(依海拔高度劃分)

Altitude(m)	ME	SD	RMSE	Elevation point	
				Count	Ratio
0-100	-3.147	6.113	6.875	8,526	9.42%
100-200	-4.662	7.687	8.990	6,448	7.13%
200-300	-3.719	8.961	9.701	4,987	5.51%
300-400	-2.574	9.417	9.761	3,572	3.95%
400-500	-1.876	12.440	12.579	3,583	3.96%
500-1500	-0.548	12.551	12.562	29,772	32.91%
1500-2500	3.017	16.097	16.377	21,606	23.88%
2500-4000	1.822	14.380	14.495	11,973	13.23%

第五章 結論與建議

依據本研究中分析 ICESat-2 地形高程於台灣本島之精度表現與特性分析成果，以下綜整本研究之貢獻並歸納幾點結論，最後根據研究過程中所遭遇之限制或困難，提出幾點建議。

第一節 結論

一、本研究藉由文獻回顧整理出 ICESat 與 ICESat-2 之各項差異，由相關設計與任務配置的不同指出 ICESat-2 更適用於提供本研究區域作為高程資料。此外，藉由相關文獻統整出 GDEM 高程精度評估所考慮之影響面向後，本研究參酌以土地覆蓋類別、坡度及海拔高度為影響因子分析 ICESat-2 地形高程於研究區域之高程特性。

二、本研究以 ICESat-2 ATL08 高程點為單位，分析其於本研究區域之地形高程特性，另以 DEM 習慣上用於管理及查找之行政區及分幅方式進一步以不同空間單元分析高程特性，行政區以鄉鎮市區為單元，分幅以基本地形圖比例尺五千分之一圖框為單元，用以提升 ICESat-2 地形高程之實用性，並透過 ICESat-2 提供台灣大範圍的高程資料。

三、高程精度評估之研究成果指出 ICESat-2 ATL08 地形高程於於整體上略低於參考 DEM，具有 0.337 公尺之負偏差，高程誤差之分布大致呈常態分布，且主要集中於誤差零周圍兩側，經計算可得高程誤差之標準差為 9.560 公尺，RMSE 為 9.565 公尺。

四、特性分析之研究成果指出 ICESat-2 ATL08 高程誤差隨土地覆蓋由無植被變為完全植被覆蓋而增加；高程誤差與坡度具正向關係，而誤差增加幅度隨坡度的增加由高增加幅度遞減為低增加幅度，又於高坡度下變為高增加幅度；高程誤差與海拔高度具有正向關係，然誤差增加幅度隨海拔高度的增加而逐漸下降，誤差趨勢線具明顯轉折處，海拔高度低於轉折處之區域對於海拔高度的增加較敏感，趨勢較為陡峭，高於轉折處之趨勢則趨於平緩。



第二節 建議

關於研究過程中所遇到之困難與限制，本研究提出以下幾點建議，供未來研究 ICESat-2 地形高程於台灣本島之研究作為參考與改進：

- 一、本研究以 ICESat-2 ATL08 進行台灣本島大範圍之分析，雖本研究已廣納多筆高程資料，然限制於 ATL08 於光子不足區域無法產製高程資訊，故於台灣本島範圍中仍有無高程資訊之區域存在，建議後續研究可於 ICESat-2 完成任務後，使用其後續所提供之高程資訊進行更完整之研究。
- 二、本研究於高程特性之影響因子中僅考慮地形特徵與地表特性面向，建議後續研究可加入 ICESat-2 資料收集狀況與儀器設備面向之影響因子，如雜訊比、強弱光束等，提供未來於 ICESat-2 資料選用上作為參考。
- 三、本研究著重於大範圍之高程分析，而 ICESat-2 另有以光子為單位紀錄之高程資料，即 ATL03，建議日後針對小區域進行之研究可以使用 ATL03 進行相關高程分析，並可與其他適用於中小區域高程分析之現有測量方式進行比較。

參考文獻

一、中文參考文獻

- 王國隆、林俊廷、張峻瑋、林妍琇、洪志祥、洪政義、邱啓芳、傅桂霖, 2019, 「結合高精度無人載具測量及差分干涉合成孔徑雷達與 NDSI 分析於土砂量體的評估方法」,『農業工程學報』, 65(4) : 26-39。
- 吳仲民, 2008,「應用數值航空攝影測量於地形高程變異之評估」, 中興大學土木工程學系所碩士論文。
- 吳繹如, 2010,「利用 GRACE 重力與 ICESat 測高衛星資料估算南極大陸之冰下地形及地殼厚度」, 臺灣大學地質科學研究所碩士論文。
- 卓荒陞, 2015,「應用 DEM 區塊法探討八掌溪河道變遷」, 交通大學土木工程系所碩士論文。
- 林老生, 2012,「e-GPS 水準測量精度研究」,『臺灣土地研究』, 15 : 35-58。
- 林莉萍、王正楷、曾義星、朱宏杰, 2014,「應用空載光達資料估計森林樹冠高度模型及葉面積指數」,『航測及遙測學刊』, 19(2) : 107-123。
- 邱宜珊, 2020,「利用 PSInSAR 觀察原住民部落之地表形變-以尖石鄉秀巒村為例」, 政治大學地政學系所碩士論文。
- 陳國華, 2004,「整合 TWVD2001 水準及 GPS 資料改進台灣區域性大地水準面模式以應用於 GPS 高程測量」, 成功大學測量及空間資訊學系所博士論文。
- 覃美芳, 2014,「衛星測高及 GPS 測高對近岸重力之貢獻」, 交通大學土木工程系所碩士論文。
- 黃紀云, 2015,「以 20 年衛星測高資料研究青藏地區湖水位變化」, 交通大學土木工程系所碩士論文。

黃煜婷，2013，「莫拉克風災河道淤塞及變遷-以荖濃溪流域為例」，臺灣師範大學地球科學系所碩士論文。

蕭國鑫、劉進金、何心瑜、楊孟學，2010，「多時影像與 DEM 資料應用於頭前溪口變遷分析」，『地籍測量：中華民國地籍測量學會會刊』，29(1)：1-12。

蕭震洋、林伯勳、鄭錦桐、辜炳寰、徐偉城、冀樹勇，2009，「應用光達技術進行集水區土砂運移監測及攔阻率評估」，『中興工程』，105：17-25。譚克平，2007，「國中教導盒狀圖的建議及介紹如何用 EXCEL 製作盒狀圖」，『科學教育月刊』，2(305)。

鐘郁翔，2010，「利用衛星測高波形重定技術進行雲林縣地層下陷評估」，中正大學地震研究所暨應用地球物理研究所碩士論文。

二、外文參考文獻

- Abdalati, W., Zwally, H. J., Bindschadler, R., Csatho, B., Farrell, S. L., Fricker, H. A., Harding, D., Kwok, R., Lefsky, M. and Markus, T., 2010, "The ICESat-2 laser altimetry mission", *Proceedings of the IEEE*, 98: 735-751.
- Aggarwal, C. C., 2015, "Outlier analysis", Data mining.
- Bolstad, P. V. and Stowe, T., 1994, "An evaluation of DEM accuracy: elevation, slope, and aspect", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60: 1327-1332.
- Brenner, A. C., DiMarzio, J. P. and Zwally, H. J., 2007, "Precision and accuracy of satellite radar and laser altimeter data over the continental ice sheets", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45: 321-331.
- Chen, B., Xu, B., Zhu, Z., Yuan, C., Suen, H. P., Guo, J., Xu, N., Li, W., Zhao, Y. and Yang, J., 2019, "Stable classification with limited sample: Transferring a

30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017", *Sci. Bulletin*, 64: 370-373.

Chen, J., Chen, J., Liao, A., Cao, X., Chen, L., Chen, X., He, C., Han, G., Peng, S. and Lu, M., 2015, "Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 7-27.

Cleveland, W. S., 1979, "Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots", *Journal of the American statistical association*, 74: 829-836.

Cleveland, W. S., 1993, *Visualizing data*, Hobart Press.

Cleveland, W. S. and Devlin, S. J., 1988, "Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting", *Journal of the American statistical association*, 83: 596-610.

Congalton, R. G., 1991, "A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data", *Remote Sensing of Environment*, 37: 35-46.

Dettmering, D., Passaro, M. and Braun, A. (2019). Editorial for Special Issue "Advances in Satellite Altimetry and Its Application", Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

El-Mowafi, M., 2005, *Leveling By Using Global Positioning System*, Unpublished doctoral dissertation, National Research Institute of Astronomy and Geophysics.

Falkner, P. and Schulz, R., 2015, "Instrumentation for planetary exploration missions".

Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Meyer, D. and Danielson, J., 2012, "Validation of the ASTER global digital elevation model version 2 over the conterminous United States", *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 34: 281-

- Gong, P., Wang, J., Yu, L., Zhao, Y., Zhao, Y., Liang, L., Niu, Z., Huang, X., Fu, H. and Liu, S., 2013, "Finer resolution observation and monitoring of global land cover: First mapping results with Landsat TM and ETM+ data", *International journal of remote sensing*, 34: 2607-2654.
- Gopalapillai, S., Mourad, A. and Kuhner, M., 1975, "Satellite altimetry applications to geodesy, oceanography and geophysics", OCEAN 75 Conference.
- Hu, Z., Peng, J., Hou, Y. and Shan, J., 2017, "Evaluation of recently released open global digital elevation models of Hubei, China", *Remote Sensing*, 9: 262.
- Jacoby, W. G., 2000, "Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables", *Electoral Studies*, 19: 577-613.
- Jarihani, A. A., Callow, J. N., Johansen, K. and Gouweleeuw, B., 2013, "Evaluation of multiple satellite altimetry data for studying inland water bodies and river floods", *Journal of Hydrology*, 505: 78-90.
- Kaula, W., 1969, "The terrestrial environment: Solid earth and ocean physics, NASA Rep", *Study at Williamstown, MA, NASA CR-1579*.
- Lefsky, M. A., Keller, M., Pang, Y., De Camargo, P. B. and Hunter, M. O., 2007, "Revised method for forest canopy height estimation from Geoscience Laser Altimeter System waveforms", *Journal of Applied Remote Sensing*, 1: 013537.
- Liu, Z., Zhu, J., Fu, H., Zhou, C. and Zuo, T., 2020, "Evaluation of the Vertical Accuracy of Open Global DEMs over Steep Terrain Regions Using ICESat Data: A Case Study over Hunan Province, China", *Sensors*, 20: 4865.
- Magruder, L. A. and Brunt, K. M., 2018, "Performance analysis of airborne

photon-counting lidar data in preparation for the ICESat-2 mission", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56: 2911-2918.

Markus, T., Neumann, T., Martino, A., Abdalati, W., Brunt, K., Csatho, B., Farrell, S., Fricker, H., Gardner, A. and Harding, D., 2017, "The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation", *Remote Sensing of Environment*, 190: 260-273.

Martin, S., 2014, *An introduction to ocean remote sensing*, Cambridge University Press.

McGOOGAN, J. T., 1975, "Satellite altimetry applications", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 23: 970-978.

Mukherjee, S., Joshi, P. K., Mukherjee, S., Ghosh, A., Garg, R. and Mukhopadhyay, A., 2013, "Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM)", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 205-217.

Neuenschwander, A., Guenther, E., White, J. C., Duncanson, L. and Montesano, P., 2020, "Validation of ICESat-2 terrain and canopy heights in boreal forests", *Remote Sensing of Environment*, 251: 112110.

Neuenschwander, A. and Pitts, K., 2019, "The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission", *Remote Sensing of Environment*, 221: 247-259.

Neuenschwander, A., Popescu, S., Nelson, R., Harding, D., Pitts, K., Robbins, J., Pederson, D. and Sheridan, R., 2019, "Ice, Cloud, and Land Elevation 1 Satellite 2 (ICESat-2) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Land-Vegetation Along-Track Products (ATL08) release 002", *National Aeronautics and Space Administration. Goddard Space Flight Centre*,

Neuenschwander, A. L. and Magruder, L. A., 2016, "The potential impact of

- vertical sampling uncertainty on ICESat-2/ATLAS terrain and canopy height retrievals for multiple ecosystems", *Remote Sensing*, 8: 1039.
- Neuenschwander, A. L. and Magruder, L. A., 2019, "Canopy and terrain height retrievals with ICESat-2: A first look", *Remote Sensing*, 11: 1721.
- Neumann, T. A., Martino, A. J., Markus, T., Bae, S., Bock, M. R., Brenner, A. C., Brunt, K. M., Cavanaugh, J., Fernandes, S. T. and Hancock, D. W., 2019, "The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 Mission: A global geolocated photon product derived from the advanced topographic laser altimeter system", *Remote Sensing of Environment*, 233: 111325.
- Pakoksung, K. and Takagi, M., 2021, "Assessment and comparison of Digital Elevation Model (DEM) products in varying topographic, land cover regions and its attribute: a case study in Shikoku Island Japan", *Modeling Earth Systems and Environment*, 7: 465-484.
- Palm, S., Yang, Y. and Herzfeld, U., 2018, "ICESat-2 Algorithm Theoretical Basis Document for the Atmosphere, Part I: Level 2 and 3 Data Products", *National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center*.
- Popescu, S., Zhou, T., Nelson, R., Neuenschwander, A., Sheridan, R., Narine, L. and Walsh, K., 2018, "Photon counting LiDAR: An adaptive ground and canopy height retrieval algorithm for ICESat-2 data", *Remote Sensing of Environment*, 208: 154-170.
- Rinne, E. J., 2011, "Satellite altimeter remote sensing of ice caps".
- Roscoe, J. T., 1975, *Fundamental research statistics for the behavioral sciences [by] John T. Roscoe*.
- Santillan, J. and Makinano-Santillan, M., 2016, "VERTICAL ACCURACY ASSESSMENT OF 30-M RESOLUTION ALOS, ASTER, AND SRTM

GLOBAL DEMS OVER NORTHEASTERN MINDANAO, PHILIPPINES",

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 41:

Schutz, B. E., Zwally, H. J., Shuman, C. A., Hancock, D. and DiMarzio, J. P., 2005, "Overview of the ICESat mission", *Geophysical Research Letters*, 32: Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy* 2nd completely revised and extended edition, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.

Seidleck, M., 2018, "The ice, cloud, and land elevation satellite-2—Overview, science, and applications", 2018 IEEE Aerospace Conference.

Tukey, J. W., 1977, *Exploratory data analysis*, Reading, Mass.

Varga, M. and Bašić, T., 2015, "Accuracy validation and comparison of global digital elevation models over Croatia", *International journal of remote sensing*, 36: 170-189.

Wang, C., Zhu, X., Nie, S., Xi, X., Li, D., Zheng, W. and Chen, S., 2019, "Ground elevation accuracy verification of ICESat-2 data: a case study in Alaska, USA", *Optics Express*, 27: 38168-38179.

Wang, X., Cheng, X., Gong, P., Huang, H., Li, Z. and Li, X., 2011, "Earth science applications of ICESat/GLAS: a review", *International journal of remote sensing*, 32: 8837-8864.

Wessel, B., Huber, M., Wohlfart, C., Marschalk, U., Kosmann, D. and Roth, A., 2018, "Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 139: 171-182.

Xiao, R. and He, X., 2013, "GPS and InSAR time series analysis: Deformation monitoring application in a hydraulic engineering resettlement zone,

southwest China", *Mathematical problems in engineering*, 2013:

Xing, Y., Huang, J., Gruen, A. and Qin, L., 2020, "Assessing the Performance of ICESat-2/ATLAS Multi-Channel Photon Data for Estimating Ground Topography in Forested Terrain", *Remote Sensing*, 12: 2084.

Zhou, T., 2017, *Advances in Waveform and Photon Counting Lidar Processing for Forest Vegetation Applications*, Unpublished doctoral dissertation, Texas A & M University.

Zwally, H. J., Schutz, B., Abdalati, W., Abshire, J., Bentley, C., Brenner, A., Buijt, J., Dezio, J., Hancock, D. and Harding, D., 2002, "ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land", *Journal of Geodynamics*, 34: 405-445.

三、網頁參考文獻

Copernicus Programme (2021) Copernicus Global Land Service from Copernicus Programme on the World Wide Web :

<https://land.copernicus.eu/global/index.html>

ICESat/GLAS website (2003) GLAS from ICESat/GLAS website on the World Wide Web : <https://www.csr.utexas.edu/glas/>

Insights (2021) Satellite Altimetry from Insights on the World Wide Web :

<https://www.insightsonindia.com/>

NASA (2021) ICESat from NASA on the World Wide Web :

<https://www.nasa.gov/>

NASA's Goddard Space Flight Center (2021) ICESat-2 from NASA's Goddard Space Flight Center on the World Wide Web : <https://www.nasa.gov/goddard>

NSIDC (2021) ICESat-2 Product Descriptions from NSIDC on the World Wide

Web : <https://nsidc.org/data/icesat-2/products>

NSIDC (2021) ICESat-2 ATL08 from NSIDC on the World Wide Web :

<https://nsidc.org/data/atl08>

OpenAltimetry (2021) ICESat-2 ATL08 data from OpenAltimetry on the World

Wide Web : <https://openaltimetry.org/data/icesat2/>

Radar Altimetry Tutorial and Toolbox (2021) Cryosat-2 from Radar Altimetry

Tutorial and Toolbox on the World Wide Web : <http://www.altimetry.info/>

內政部國土測繪中心 (2021). e-GNSS 系統三維坐標轉換服務平台 :

<https://egnss.nlsc.gov.tw/trans/>

