

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

第十四卷 第二期

中華民國一一五年七月



VOLUME 14, NO. 2

July 2026

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 23 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、紀聰吉、曾耀賢

理 事：洪本善、高書屏、江渾欽、劉正倫、駱旭琛、王啓鋒、洪榮宏、周天穎、白敏思、邱俊榮、王定平、梁崇智、吳相忠、邱元宏、何明修、吳宗寶

秘 書 長：梁旭文（兼任）

副秘書長：陳鶴欽（兼任）

秘 書：黃華尉（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、王敏雄、朱金水

3.服務委員會（設委員 5-9 人，幹事 2-4 人）

主任委員：王啓鋒

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：周天穎

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

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：任顯豐

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、黃振傑、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、王啓鋒、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

特刊引言

國土空間框架與基準特刊

空間資訊的建置涉及不同類型的測量科技，例如觀測地理位置確定其大地坐標的定位測量、觀測地表高低起伏的高程測量、觀測水體深度的水深測量、及觀測地表重力的重力測量。在一個國家體制內，這些空間測量都必須依循共同的框架與基準，如此所建立的空間資訊才能夠互為流通或整合使用，因此我國《國土測繪法》及《基本測量實施規則》制定的測量基準，包括大地基準、高程基準、深度基準及重力基準。我們所處的世界是動態的，當年所制定的靜態測量基準會隨時間變化而產生系統性的偏差，導致每隔數年有調整一次測量基準的需求，國際上亦有制定動態測量基準的案例可循，兩者並行應用亦是可行的概念。未來如何修訂這些測量基準，以符合地球環境的變化，同時方便空間資訊相關領域的依循及應用，是當前迫切的議題，因此本期刊編輯委員會特別邀請相關專家學者提出論文，探討相關理論與實務並分析未來之趨勢。本特刊共收錄五篇論文，相關內容主要探討大地基準、高程基準、及重力基準之未來發展及趨勢（有關深度基準的討論，請參閱本期刊第十卷第一期之「水深測量與海圖基準特刊」），期盼能釐清空間資訊領域對測量基準的認知，也希望對未來修訂測量基準時有好的方案與共識可參考。

承蒙地籍測量學會理事長楊名教授、副理事長史天元教授、及編輯委員會主任委員周天穎教授的器重，委請我擔任國土測繪與空間資訊期刊「國土空間框架與基準」特刊的客座編輯，本期特刊在論文審查過程中，特地邀請了測量及空間資訊領域十餘位知名學者及專家參與匿名審查，每篇論文至少邀請兩位審查委員。在嚴謹的審稿工作後，論文作者皆針對審查意見積極回覆並反覆修改，最後順利完成此特刊，不負地籍測量學會託付的重任，在此向所有審查委員及論文作者至上最誠摯的謝意。

客座編輯 曾義星 退休教授

國立成功大學測量及空間資訊學系

序

國土空間框架與基準

測量基準，包括大地基準、高程基準、深度基準及重力基準等，是國家實施國土測繪之基本準據；而參考系統則係依據測量基準，作為基本控制測量參考所訂定之系統，包括坐標系統、高程系統、重力系統及其他相關系統。國土測繪法於96年3月21日制定公布後，內政部作為該法之主管機關，已依據該法及基本測量實施規則相關規定，明定（公告）一九九七坐標系統（TWD97）、二〇〇一高程系統（TWVD2001）、二〇〇九重力系統（GS2009）、二〇二一深度系統（TWCD2021）、重力法大地起伏模型（TWGE0ID2014）、混合法大地起伏模型（TWHYGE02014）。其後因地殼變動，部分地區點位產生明顯位移，致套合引用有實務上困難，無法符合目前測繪作業之精度需求，爰再公告一九九七坐標系統2010年及2020年成果（TWD97[2010]、TWD97[2020]）。至此，國家的空間框架基礎已稱完備。本人參與其中多項工作，深感任務重大及深具歷史意義。

臺灣地區位處地殼板塊碰撞劇烈地帶，震後位移頻繁。隨著新興測繪技術與觀測儀器精度提升，參考框架時刻、坐標時間標記、動態基準制度、週期性更新及發布機制，應研究建立完善架構，並重新檢視與更新前述相關基準及系統。內政部地政司與國土測繪中心爰委託專家學者，針對空間框架與基準、基本測量實施規則相關規範作全面通盤檢討研究，研究團隊已分別就大地基準與框架之國際發展、高程基準與高程系統研析、大地基準雙框架策略、大地起伏模型更新、利用全球導航衛星系統干涉反射技術建立高程基準之可行性等提出初步構想、評估與建議。不僅可作為國家未來測繪發展的藍圖，更深具學術研究價值。

《國土測繪與空間資訊》將前述研究成果出版《國土空間框架與基準特刊》，感謝史天元、黃金維、楊名、郭重言、陳國華、李啓民、藍文浩多位教授加入研究團隊，內政部地政司及國土測繪中心多位同仁亦參加共同研討，並特別邀請曾義星教授擔任客座編輯，編輯完成此歷史性特刊。本人相信經由大家多次深入討論之研究成果，能為國家測量基準與參考系統制度及未來發展，勾勒出完整具體規劃方向與策略，特以此序文向辛苦的研究團隊及工作同仁致謝。

內政部地政司副司長 陳杰宗

大地基準與框架之國際發展

史天元^{1*} 楊名² 郭重言³ 李啓民⁴ 吳俊毅⁵ 鄧淳中⁶

論文收件日期：115.05.11

論文修改日期：115.06.02

論文接受日期：115.06.15

摘 要

大地基準(Geodetic Datum)，是各國建立其測量製圖及空間資訊應用所依據之空間框架。在以三角測量為主要技術的年代，大地基準之全球連結主要仰賴天文測量加以實現。而今，包含特長基線干涉測量(Very-Long Baseline Interferometry, VLBI)、衛星雷射測距(Satellite Laser Ranging, SLR)，與全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)等空間測地技術的整合，已為全球一體且高精度之空間參考架構，奠定了堅實的實現基礎。

當今國際上各國的大地基準，多已採用 GNSS 的連續運營參考站(Continuous Operating Reference Station, CORS)所構成之網系，並對齊特定曆元的國際地球參考框架(International Terrestrial Reference Frame, ITRF)，作為國家大地基準之實現方法，臺灣大地基準(Taiwan Datum 1997, TWD97)亦屬此類架構。隨著板塊運動、地殼變形及地震等效應日益受到重視，大地基準由靜態模式逐步朝向可反映時變之動態模式發展。紐西蘭於 1998 年正式發佈並實施稱為 New Zealand Geodetic Datum 2000 (NZGD2000)半動態大地基準，即為此一轉型的重要里程碑，代表國家大地基準管理進入兼顧空間與時間變化的新階段。本文回顧美國、日本、歐盟、澳洲、紐西蘭的大地基準發展，分析其在基準框架維護、曆元更新及動態管理方面之作法，作為規劃新一代臺灣大地基準之重要參考。

關鍵詞：位移、半動態、地殼變形、大地基準、時變、變形模型

^{1*} 榮譽退休教授，國立陽明交通大學土木工程學系，TEL: +886-3-5712121 #54957，E-mail: tyshih@nycu.edu.tw。

² 教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

³ 教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

⁴ 助理教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

⁵ 科長，內政部地政司。

⁶ 科員，內政部地政司。

International Developments in Geodetic Datums and Frames

Tian-Yuan Shih^{1*}, Ming Yang², Chong-Yen Kuo³, Chi-Ming Lee⁴, Chun-Yi Wu⁵, Chun-Chung Teng⁶

ABSTRACT

Geodetic Datum serves as the fundamental spatial reference framework for national surveying, mapping, and geospatial information applications. During the era when triangulation was the primary surveying technique, the global connection of geodetic datums was mainly achieved through astronomical observations. With advances in geodetic technology, the integration of space geodetic technologies, such as Very-Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite Laser Ranging (SLR), and Global Navigation Satellite Systems (GNSS), has established a solid foundation for the realization of a globally unified and highly accurate spatial reference framework.

At present, most countries have adopted national geodetic datums based on networks of GNSS Continuous Operating Reference Stations (CORS), and aligned with the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) at a specific reference epoch. Taiwan's geodetic datum, TWD97, is also implemented under this framework. As tectonic plate motion, crustal deformation, and seismic activities have become increasingly significant, geodetic datums have gradually evolved from static models toward dynamic frameworks capable of reflecting temporal variations. In 1998, New Zealand officially released and implemented a semi-dynamic geodetic datum known as the New Zealand Geodetic Datum 2000 (NZGD2000), marking an important milestone in this transition, representing a new stage in national geodetic datum management that considers both spatial and temporal changes.. This paper reviews the geodetic datum developments in the United States, Japan, the European Union, Australia, and New Zealand, and analyzes the approaches to reference frame maintenance, epoch updates, and dynamic management. The findings are intended to provide important references for the planning and development of the next-generation geodetic datum in Taiwan.

Keywords: Crustal deformation, Deformation model, Displacement, Geodetic datum, Semi-dynamic, Temporal variations

^{1*}Professor Emeritus, National Yang Ming Chiao Tung University, TEL: +886-3-5712121 #54957, E-mail: tyshih@nycu.edu.tw

² Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

³ Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

⁴ Assistant Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

⁵ Section Chief, Department of Land Administration, Ministry of Interior

⁶ Staff, Department of Land Administration, Ministry of Interior

一、前言

「國際地球參考框架」(International Terrestrial Reference Frame, ITRF)是「國際地球參考系統」(International Terrestrial Reference System, ITRS)的實現(Wikipedia, 2024a, b)，是聯合國決議中全球諸國應參考的測量框架，亦即以之作為「全球大地參考框架」(GGRF, Global Geodetic Reference Frame)(UN-GGIM, 2016)。因此，當代大地基準與框架最重要的國際發展，就是對齊 ITRF 之基本精神。

ITRF 是一個將時間變異納入考量的框架，由 1992 年以來，各國的國家測量基準，均始於對齊 ITRF 某一個實現版本的某一時刻，其後維持不變，不隨時間調整。這是一個稱為「靜態」(Static)的模式。相對應的是「動態」，這個名詞於早期使用的英文是「Dynamic」，近期國際學界傾向區分「Dynamic」與「Kinematic」的不同意涵(Donnelly *et al.*, 2013; Ronen & Even-Tzur, 2017; Poutanen & Häkli, 2018)。

「Kinematic」的對應中文名詞是「運動的」，是對「運動」(Motion)的描述，術語「Dynamic」(動態)在物理學上通常涉及「力」(Force)的影響。就測量基準而言，大地坐標隨時間的連續變化純粹是「運動」的描述，所以應該使用「Kinematic Datum」。但是一般的中文使用中，兩者間的區分是混亂的，如「Kinematic」在電力工程領域翻譯為「運動的」，而在地理學名詞-測繪學名詞領域「Kinematic Positioning」譯之為「動態定位」(國家教育研究院)。由而，將「Dynamic Datum」與「Kinematic Datum」均譯之為「動態基準」的現象，似乎是可以接受的。

相似於「Dynamic」與「Kinematic」的議題，「時變」也有著兩個英文名詞對應著不同意涵：「Time variant」與「Time dependent」。在空間資訊與大地測量領域，這兩個名詞雖然都標示隨時間而變，但定義的維度和應用場景有明顯區別：

1. Time-dependent (隨時間變化的 / 時間相依)

一個描述屬性的詞。指某個物理量或數據會隨著時間的推移而改變，其數值是時間(t)的函數。亦即某個量或系統的行為、數值、或結果與時間相依，亦即時間是影響該量的一個變數或參數。其核心概念是數值不是固定的。如「Time-dependent coordinates」(時變坐標，隨時間變化的坐標)。因為板塊運動或地殼形變，同一個地面點在不同時刻的坐標值是不同的。簡單的說，只要會動、會變的東西，都可以說是「Time-dependent」。強調的是「時間」作為輸入或條件的角色。例如，一個方程式若含有時間變數 t ，即可稱為「Time-dependent」。此詞較偏重描述性，說明某事物與時間有關聯，但不一定意味著系統本身的結構或特性發生改變。國際石油與天然氣生產者協會(International Association of Oil & Gas Producers, IOGP)便使用「Time-dependent」一詞(IOGP, 2026)。

2. Time-variant (時變的 / 與時間相關的系統)

通常用於描述系統、框架或模型。指系統本身的特性、參數或結構會隨時間改變，強調系統的內在性質並非固定不變。其核心概念是規則或結構會隨時間改變。此詞主要用於系統理論與訊號處理領域，與「Time-invariant (非時變/時不變)」相對。一個時變系統，其在不同時間點對相同輸入訊號會產生不同的輸

出響應。如「Time-variant reference frame」(時變參考框架)。這指的不是坐標本身在變,而是整個參考框架的「定義參數」(如原點、尺度、定向)會隨時間演化。另外,涉及物理場(如重力、荷載)時,使用了「Time-varying」(Petit & Luzum, 2010)。

當我們說一個基準是 Kinematic (運動的) 時,其點位坐標是 Time-dependent (因為點在動),而用來描述這個運動的模型或基準定義則是 Time-variant (因為參考標準隨時間演進)。

在一般的學術與工程應用中,「Time-dependent」(隨時間變化的/依賴時間的/時間相依)與「Time-variant」(時變的)經常交替使用,但在嚴謹的定義中各有側重。

「Time-dependent」是一個描述性的形容詞,強調某個變數、屬性或參數本身會隨時間改變。「Time-variant」是一個系統屬性的定義,用來描述一個系統的「響應特性」會隨輸入時間的不同而改變。換句話說,如果對同一個系統在時刻 t_1 輸入訊號 A,與在時刻 t_2 輸入同樣的訊號 A,得到的系統響應(Output)不同,則該系統被定義為「Time-variant」(Wikipedia, 2026)。另一個定義「Time-variant」是「Time-invariant」以外的,也就是,不是「Time-invariant」就是「Time-variant」。Oppenheim & Willsky (1997)對於「Time-invariant」的性質與條件有十分深入的探討與描述。

就測量基準與參考框架領域而言,「Time-dependent」是目前較為普遍使用的形容詞,但是就中文而言,「Time-variant」及「Time-dependent」均以「時變」作為對應的翻譯,應該是可以接受的選擇。因為在中文語境中刻意區分「時變」與「時間相依」,實質意義似乎並不顯著。

當代大地基準與框架在靜態的對齊 ITRF 之後,持續的發展便是納入「時變」。本文謹先探討 ITRF,再回顧數個納入時變框架的大地基準。

二、ITRF 與其不同定義間轉換

ITRF (國際地球參考框架)的實現與維護,由「國際地球自轉與參考系統服務」(International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS)負責。IERS 於 1987 年由「國際天文聯合會」(International Astronomical Union, IAU)與「國際大地測量及地球物理聯合會」(International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG)共同創立,並於 1988 年 1 月 1 日正式運作,承接原「國際時間局」(Bureau International de l'Heure, BIH)負責之地球自轉業務,以及「國際極移服務」(International Polar Motion Service, IPMS)之相關工作,具體的任務如下(IERS Website)。

- 「國際天球參考系統」(International Celestial Reference System, ICRS)及其實現「國際天球參考框架」(International Celestial Reference Frame, ICRF)。
- 「國際地球參考系統」(International Terrestrial Reference System, ITRS)及其實現「國際地球參考框架」(International Terrestrial Reference Frame, ITRF)。
- 研究地球定向變化,以及於 ICRF 與 ITRF 之間進行轉換所需之地球定向參數(Earth Orientation Parameters, EOPs)。

- 用以解釋 ICRF、ITRF 或 EOPs 在時間與空間上變化之地球物理資料，並建立相關變化模式。
- 促進國際一致性之標準、常數與模型。

除了空間的框架外，時間的一致性亦由 IERS 負責，每年發布兩次閏秒公告，以確保 UTC 與 UT1 的差異維持在 0.9 秒以內(IERS Bulletin C Guide)。

IERS 本身並非單一機構，而是由分布全球的觀測站、分析中心與協調中心所組成的國際協作網絡。其建構 ITRF 所採用之空間大地測量技術，主要包含以下四類：

- VLBI (Very Long Baseline Interferometry, 特長基線干涉測量)：利用多個相距極遠之無線電望遠鏡，同步接收如類星體(Quasar)外射電源訊號，以干涉測量原理精確測定站間基線向量及地球定向參數，為 ITRF 提供最高精度之定向與尺度基準。
- SLR/LLR (Satellite Laser Ranging / Lunar Laser Ranging, 衛星/月球雷射測距)：以地面雷射站向衛星或月球上之反射標的發射雷射脈衝並接收反射訊號，測定精確距離，是確定地球重心(地心, Center of Mass, CM)位置的核心技術，為 ITRF 原點(Geo-center)定義提供主要約制。
- GNSS (Global Navigation Satellite System, 全球導航衛星系統)：藉由全球連續運作之 GNSS 追蹤網，提供大量、密集且成本相對低之觀測資料，大幅提升 ITRF 的全球覆蓋率與框架的實用性，為近代 ITRF 版本最重要的資料來源之一。
- DORIS (Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite, 都卜勒衛星軌道測定與無線電定位整合系統)：DORIS 系統的運作原理以都卜勒頻移效應(Doppler Effect)為核心。其架構與一般 GNSS 系統相反，訊號發射端設於地面，接收端設於衛星上。透過地面信標站發射無線電訊號，由搭載 DORIS 接收機之衛星接收，利用都卜勒頻移原理精確測定地面站位置。目前在全球設有約 80 個永久性地面信標站，由法國國家太空研究中心(Centre National d'Études Spatiales, CNES)與國家地理學院(Institut Géographique National, IGN)共同負責管理維護。這些站點在地理分布上的一大特點，是刻意設置在南半球、太平洋島嶼、極地地區及非洲大陸等傳統大地測量技術覆蓋較為薄弱之地區，有效彌補了 GNSS 追蹤網與 SLR 站網在偏遠地區的空白，對於提升 ITRF 全球幾何強度與均勻性具有重要貢獻。

在 ITRF 定義中，各個技術的主要貢獻分別為，VLBI：尺度與天地框架連結；SLR：尺度與地心；GNSS：高密度全球坐標；DORIS：軌道與全球均勻分布。各具互補性。

(一) ITRF 的早期版本：ITRF88 與 ITRF89

ITRF 的第一個正式版本 ITRF88 於 1988 年發布，隨後陸續推出 ITRF89、ITRF90 等版本。這些早期框架標誌著全球大地測量從傳統天文大地測量方式，朝向以空間大地測量技術為主導之現代化全球參考框架轉型的開端，具有重要的歷史意義。

就技術組成而言，ITRF88 與 ITRF89 主要整合了 SLR 與 VLBI 的觀測資料。當時 GPS 技術尚未全面成熟，星座部署尚未完整，全球連續追蹤網亦尚未建立，因此 GNSS 在早期框架建構中的貢獻程度，遠不及後續版本。儘管如此，這兩個初期版本已初步確立了以多種空間大地測量技術聯合平差，建構全球統一參考框架的基本架構與方法論，為後續版本的持續精化奠定了重要基礎。

(二) ITRF1992：現代化大地基準的里程碑

儘管 ITRF1992 並非 ITRF 的最初版本，但在大地測量發展史上，無疑是一個具有深遠意義的轉折點。其關鍵意義在於與「國際 GPS 服務」(International GPS Service, IGS，現已更名為國際 GNSS 服務)的運作緊密結合。

IGS 於 1994 年正式成立，但其試運作階段自 1992 年便已展開，並開始建立全球連續 GPS 追蹤網。隨著 IGS 的逐步啟動，來自全球各地連續運作 GPS 追蹤站的高品質觀測資料，成為 ITRF 建構的重要數據支撐，使框架的全球覆蓋率與幾何強度大幅提升。ITRF1992 正是在此背景下建立，首度充分整合了 IGS 網絡所提供的 GPS 觀測資料，使 ITRF 從以往偏重純粹大地測量科學研究的工具，正式轉型為服務全球高精度定位、導航與地球科學應用的現代化實作框架。

因此，在測繪與大地測量專業領域中，ITRF1992 常被視為現代大地基準與 GNSS 技術深度整合的標誌性時刻，不僅提升了框架的精度與實用性，更奠定了此後 ITRF 各版本持續以多技術聯合解算、並與 IGS 產品緊密協作之發展模式。當前的最新實現版本是 ITRF2020，最近的前一版本是 ITRF2014。

ITRF 在演進中，逐步精化。相對應於前期版本，ITRF2014 與 ITRF2020 引入了更精密的時變模型 (Time-dependent models)，用以修正因地球動力學 (如板塊運動、地震、震後變形及季節性荷重) 造成的坐標變動(Altamimi *et al.*, 2023)。這些模型包含：

1. 14 參數轉換 (14-parameter Transformation)

這是用於兩個不同參考框架 (例如從 ITRF2014 轉換到 ITRF2020) 之間的動態轉換模型。組成要素：包含 7 個靜態參數 (3 個平移、3 個旋轉、1 個尺度偏移) 及其對應的 7 個變化率 (Rates)，共 14 個參數。其運作方式為坐標隨時間線性演進。透過參考曆元 (Reference Epoch) 的參數加上隨時間累積的變化率，可精確計算出任何時刻兩個框架間的相對位移。ITRF2020 與 ITRF2014 之間的轉換定義為在 2015.0 曆元時旋轉參數為零，且兩框架間的旋轉速率亦為零，以確保方向的一致性。表 1 為由 ITRF2020 轉換至 ITRF2014 在 2015.0 曆元時之轉換係數(ITRF Website)。

表 1 ITRF2020 至 ITRF2014 之 14 參數轉換係數值

參數	數值 ($t_0 = 2015.0$)	年變化速率
X 平移 (Translation)	-1.4 mm	0 mm/yr
Y 平移 (Translation)	-0.9 mm	-0.1 mm/yr
Z 平移 (Translation)	1.4 mm	0.2 mm/yr
尺度 (Scale)	-0.42 ppb	0
X 旋轉 (Rotation)	0	0
Y 旋轉 (Rotation)	0	0
Z 旋轉 (Rotation)	0	0

2. 板塊運動模型 (Plate Motion Model, PMM)

PMM 用於描述構造板塊的剛性旋轉運動，主要處理觀測站坐標的長期線性趨勢。ITRF2014 使用 ITRF2014-PMM，有 14 個主要構造板塊。利用遠離板塊邊界的穩定觀測站速度場，估算各板塊的歐拉旋轉向量。ITRF2020-PMM 包涵 13 個主要構造板塊。板塊運動模型 (PMM) 的改變，本質上反映了全球衛星觀測數據 (GNSS、SLR、VLBI、DORIS) 在不同時期的累積成果。ITRF2014 主要依據 ITRF2014 速度場估算，數據累積時間較短，且受地震後變形 (Post-Seismic Deformation, PSD) 影響的測站處理技術在當時尚在完善階段。ITRF2020-PMM 使用之數據累積至 2020 年底，觀測時間多出 6 年。納入了更多新設置的觀測站，特別是在一些地質脆弱或數據稀疏的板塊上，顯著提升了全球覆蓋率。在時間與空間的維度上，均有顯著提升。

ITRF2020 另一項顯著改進在於修正了原點速率偏差 (Origin Rate Bias, ORB)。相較於 ITRF2014 假設地心平移速率為零，ITRF2020 首次明確識別出其速度場與板塊運動模型 (PMM) 之間存在原點速率偏差，尤其在 Z 軸方向有約 0.74 mm/yr 的偏移。因此，在使用 PMM 預測水平速度時，納入此偏差方能確保與 ITRF2020 參考框架完全一致。此外，受惠於觀測數據的累積，ITRF2020-PMM 的建模精度較前代提升，加權均方根誤差 (Weighted Root Mean Square, WRMS) 達到約 0.25 mm/yr。

由於前述因素，板塊建模精化後，板塊數量更變為 13 個。ITRF2020 由於剔除了更多受震後變形和季節性噪聲影響的非線性干擾，估算的歐拉旋轉向量 (Euler Vectors) 更為穩定。水平速度的加權均方根誤差 (WRMS) 約為 0.25 mm/yr，表現優於 ITRF2014 版本。對非線性位移的整合 ITRF2014 主要專注於線性速度。ITRF2020 在計算 PMM 時，更完整地分離了季節性訊號 (周年/半年, Seasonal Signals, Annual/Semi-Annual) 與長期的板塊運動，這使得 ITRF2020-PMM 提供的「剛性運動」參數更純粹，不受短期環境荷重的干擾 (Altamimi et al., 2023)。

3. 其他關鍵時變模型

除了 14 參數線性轉換與板塊運動，ITRF2020 進一步強化了非線性運動的建模：震後變形模型 (Post-Seismic Deformation Model, PSD Model)：針對受大地震影響

的觀測站，使用參數化模型（如對數或指數函數）描述震後的非線性地殼形變軌跡。ITRF2020 首次在產品中正式包含週年（Annual）與半年（Semi-annual）的週期性變動模型，主要修正由大氣、海洋與積雪荷重引起的季節性位移。當觀測站發生突發位移，如更換天線、設備或地震偏移時，採用分段線性函數（Piecewise Linear Functions）模型維護坐標連續性。

(三) ITRF 實用情境探討

兩個不同參考框架轉換過程不僅要考慮空間位置的偏移，更要考慮這些偏移隨時間變化的「速率」，這是採用 14 參數轉換的基本原因。除此之外，在各個 ITRF 的實現中，各個觀測站也有坐標（Coordinates）與速度（Velocity），稱為「測站參數」（Station Parameters）。謹此以幾個實用情境，探討 ITRF 時變參數的使用。

1. 在 ITRF2020 框架下計算某 ITRF 站某一時刻的測站坐標

在特定的 ITRF 框架中（同一個框架內），測站的坐標會隨時間演進。在 ITRF2020 框架下計算如 2026.0 的某一 ITRF 測站坐標，最準確的做法是直接使用该站 ITRF 提供的坐標與速率。最基礎的關係式為：

$$X(t) = X(t_0) + \dot{X}(t - t_0) \quad (1)$$

$X(t)$ ：目標曆元 t 的坐標。

$X(t_0)$ ：參考曆元 t_0 的坐標（ITRF2020 預設為 2015.0）。

$\dot{X}$ ：該測站的速度（Velocity），主要由板塊運動決定。

至於是否需要考量 PMM 或其他模型，取決於該站的性質與位置：

- (1) 通常不需要使用 PMM，因為測站的測站速率 $\dot{X}$ 已經包含了板塊運動的影響。直接使用 $\dot{X}$ 進行線性外推比使用 PMM 模型更精確。例外情況是，當該測站是新設站點且缺乏足夠觀測數據來估計自身速度時，才會參考 PMM 來給定一個初始速度。

- (2) 如果該測站位於曾發生大地震的區域（如臺灣、日本、紐西蘭），ITRF2020 會提供該站的 PSD (Post-Seismic Deformation) 參數（對數或指數函數）。計算方式：

$$X(t) = X(t_0) + \dot{X}(t - t_0) + \delta\text{PSD} \quad (2)$$

如果不加這一項，坐標誤差可能達數公分。

- (3) 若追求毫米級精度，需加上由環境負載（大氣、水、雪）引起的週期性位移季節性訊號：ITRF2020 為每個測站提供了周年與半年變換參數的正弦波參數。
- (4) 如果是從 PMM 或是其他框架轉換過來的坐標，需注意原點速率偏差修正（Origin Rate Bias），如前所述 ITRF2020 存在約 0.74 mm/yr 的 Z 軸速率偏差。但若直接使用 ITRF2020 官方坐標檔，此項已內含。

2. 在 ITRF2020 框架下計算某站某一時刻的測站坐標，該站並非 ITRF 測站

對於非 ITRF 測站，亦即沒有官方直接提供坐標與速度的站點，在 ITRF2020 框架下計算該站於某一時刻（如 2026.0）的坐標，通常遵循以下實務流程：

- (1) 確定參考曆元的坐標 $X(t_0)$

先以如 GNSS 靜態測量觀測方式，取得該站在某個特定時刻的 ITRF2020 坐

標。通常是透過精密單點定位(Precise Point Positioning, PPP)，使用如 CSRS-PPP 已支援 ITRF2020 之線上服務。或採用相對定位方式，與附近的 IGS 基準站聯測，並解算至 ITRF2020。

(2) 獲取測站速度 $\dot{X}$

因為該站不是 ITRF 站，沒有官方速度值，需考量 PMM。最常見的做法是使用 ITRF2020-PMM，將該站的經緯度代入 ITRF2020-PMM 公式，計算其所屬板塊的「剛性旋轉速度」。所需注意處為，這僅代表板塊整體的移動，無法反應區域性的地殼形變。這也是區域型參考框架如「亞太參考框架」(Asia-Pacific Reference Frame, APREF)與「國家參考框架」如「澳洲地球參考框架」(Australian Terrestrial Reference Frame, ATRF)作用之處。區域速度場模型（如基於臺灣數百個連續觀測站擬合的模型），會比全球性的 PMM 精確得多。

(3) 處理非線性位移震後變形 (PSD)

雖然該站不是 ITRF 站，但如果位於地震影響區，仍須套用鄰近 ITRF 站的 PSD 參數進行修正，或參考區域性的地震形變模型。

(4) 原點速率偏差 (Origin Rate Bias)

若初始速度是來自舊框架或其他來源，計算時需考慮 ITRF2020 特有的 0.74 mm/yr (Z-rate) 修正。

3. 由非 ITRF 測站某站某一時刻如 2016.0 的 ITRF2014 測站坐標，計算該站在 ITRF2020 框架下坐標

要將非 ITRF 測站的坐標從 ITRF2014 轉換至 ITRF2020，標準流程分為「時間歸算」與「框架轉換」兩個核心步驟。作業程序為：

(1) 取得該站在 ITRF2014 下的速度 $\dot{X}(2016.0)$

由於是非 ITRF 測站，需要先確定該站的移動速率。可以使用 ITRF2014 PMM，輸入測站經緯度，求得其板塊運動速度，或自行解算測站速度。自行解算之條件是該站有長期觀測、品質合適之資料。

(2) 將坐標歸算至 ITRF2014 的參考曆元 (2010.0)。

(3) 跨框架轉換(ITRF2014 → ITRF2020)

使用 IERS 提供的 14 參數轉換公式。包含 7 個位置參數與 7 個速率參數。首先計算 2010.0 時刻的變換參數：

$$P(2010) = P_0 + \dot{P}(2010 - 2015) \quad (3)$$

式中 P 是「變換參數」(Transformation Parameters)的集合，代表了描述兩個坐標系之間幾何差異的 7 個參數：三個平移 T 、三個旋轉 R 、一個尺度 D 。因為 ITRF 框架是動態的，框架之間的相對位置會隨時間改變。因此： P_0 是在參考曆元 (ITRF2020 為 2015.0) 時，那 7 個參數的初始值。 $\dot{P}$ 是這 7 個參數隨時間變化的變化率 (Rates)。 $P(2010)$ 代表透過變化率推算回 2010.0 年時，那 7 個變換參數分別是多少。

再執行 Helmert 變換：

$$X_{20}(2010.0) = X_{16}(2010.0) + T(2010) + R(2010) X_{16}(2010.0) + D(2010) X_{16}(2010.0) \quad (4)$$

(4) 轉換速度至 ITRF2020 ($\dot{X}_{2020}$)

同樣利用 14 參數中的速率項，將 ITRF2014 的速度轉換為 ITRF2020 框架下的速度。

(5) 推算至 ITRF2020 的目標曆元(例如 2026.0)

最後，使用 ITRF2020 的坐標與速度，推算出最終位置：

$$X_{2020}(2026.0) = X_{2020}(2010.0) + \dot{X}_{2020}(2026.0 - 2010.0) \quad (5)$$

實務上的重點是 PMM 的切換，在 ITRF2014 階段應使用 ITRF2014 PMM；轉換到 ITRF2020 框架後，若需預測未來位移，則應改用 ITRF2020 PMM 以確保一致性。轉換過程中，ITRF2020 會自動修正 ITRF2014 存在的前述原點 Z 軸速率偏差（約 0.7 mm/yr）。同時，如果精度要求較低，為公分級，則可簡化過程，直接將 $X_{2016}(t)$ 帶入 14 參數公式轉成 $X_{2020}(t)$ ，再用 ITRF2020 PMM 進行後續時間推算。

情境三是一個較複雜的過程，謹此再討論如下。當在兩個不同的 ITRF 框架之間轉換時(跨框架轉換)，14 個參數要分為兩部分應用。首先，坐標轉換 (Position Transformation) 使用 7 個位置偏移參數及其隨時間演變的速率，計算在時刻 t 的變換參數 $P(t)$ 。最終坐標透過這些隨時間變動的參數進行變換。測站的速度也必須隨框架進行轉換。這部分的關係式通常是坐標轉換式的時間導數 (Time Derivative)：

$$\dot{X}_2 = \dot{X}_1 + \dot{T} + \dot{D}X_1 + \dot{R}X_1 \quad (6)$$

$\dot{X}_1$ 、 $\dot{X}_2$ 分別為框架 1 與框架 2 中的測站速度。 $\dot{T}$ 、 $\dot{D}$ 、 $\dot{R}$ ：變換參數的變化率 (Rates)，這正是 14 參數中的後 7 個參數。

14 參數中的前 7 個(T , R , D)修正的是坐標的空間差異；後 7 個($\dot{T}$ 、 $\dot{D}$ 、 $\dot{R}$)修正的是框架定義隨時間漂移的差異。測站速度 X 是 ITRF 的內建屬性。當進行 14 參數轉換時，測站速度必須與 14 轉換參數的「速率項」疊加，才能確保轉換後的坐標在目標框架中依然具備正確的運動軌跡。ITRF2020 導入 14 參數轉換的主要目的，就是為了讓不同年份定義的框架能透過這些參數，精確地對齊彼此的坐標原點、方向與其隨時間的變動。如果是在相同框架中轉換至不同對應曆元，則不需要使用 14 參數。

三、美國、歐盟、日本、澳洲及紐西蘭大地基準

在當下各國測量基準之中，美國、歐盟、日本、澳洲及紐西蘭 5 個國家與地區之大地基準，均嚴謹的對齊 ITRF 框架，並已經納入時變考量。其中，日本、澳洲及紐西蘭業已正式實施，美國業已廣泛提供服務，但是此刻尚未法定公告。謹此簡要回顧現況如下。

(一) 美國

美國的現代化(modernized)國家空間參考系統(National Spatial Reference System, NSRS) 構建於兩大支柱之上：幾何坐標參考框架 (Geometric Coordinate Reference Frames) 以及大地位基準 (Geopotential Datum)。美國現代化國家空間參考系統 (Modernized NSRS)為了因應動態地球所造成的點位位移，捨棄了過往靜態框架的思維，轉而採用時變 (Time-dependent) 架構，以確保空間數據的長期精確性與一致性。根據美國國家大地測量局 (National Geodetic Survey, NGS) 的規劃，現代化 NSRS 的幾何框架透過下列兩大要素共同維護(NGS, 2021)：

- 隨板塊運動的參考框架 (Plate-Fixed Terrestrial Reference Frames, PFTRFs)
由於美國國土橫跨四個主要構造板塊，NGS 定義了四個對應的參考框架：北美框架 (NATRF2022)、太平洋框架 (PATRF2022)、馬里亞納框架 (MATRF2022) 以及加勒比海框架 (CATRF2022)。以 NATRF2022 為例：NATRF2022 (North American Terrestrial Reference Frame of 2022) 專為北美板塊設計。在數學定義上與全球參考框架 ITRF2020 保持同步且共用相同的原點與尺度；然而，NATRF2022 以一組精確的板塊運動模型 (PMM) 抵消了北美板塊整體的剛性旋轉運動。這意味著對於位於美國本土穩定區域的使用者而言，即便板塊每年的絕對位移達數公分，但在 NATRF2022 框架下，控制點的坐標隨時間變化的幅度將極小化，有效減輕了頻繁更新坐標的負擔。
- 框架內速度場模型 (Intra-Frame Velocity Model, IFVM)
即便 PFTRFs 抵消了板塊整體的旋轉，地殼內部仍存在非剛性的形變。因此，NSRS 引入了 IFVM2022 作為關鍵補償工具。功能與應用：IFVM 用於描述板塊內部因冰河均衡調整(Glacial Isostatic Adjustment, GIA)、震後變形 (PSD)、構造應變或地面沉降所引起的殘餘速度。在平差計算面向，IFVM 提供點位坐標時間序列的變動趨勢，作為高精度平差計算的先驗資訊。在坐標歸算面向，允許使用者將不同觀測曆元（如 2026.0）的觀測值，精確歸算至框架的參考曆元 (2020.0)，確保幾何測量成果不會因觀測時間差而產生畸變(NGS, 2021)。

總結而言，美國現代化 NSRS 經由 NATRF2022 的板塊固定特性與 IFVM 的局部形變修正，成功建立了一個既能對接國際 ITRF 框架，又能兼顧地方測繪穩定性的動態空間基準體系。

(二) 歐盟

1989 歐洲大地參考系統(European Terrestrial Reference System 1989, ETRS89)是歐洲的官方大地基準，是一個全歐洲統一的坐標系統，用來確保地理資訊系統、測繪、導航應用在跨國界時保持一致。

ETRS89 是基於國際地球參考系統(International Terrestrial Reference System, ITRS)而建立的，以 1989.0 為參考曆元，當時是與 ITRS 完全對齊的。但與 ITRS 不同的是，ETRS89 係固定於歐亞大陸穩定部分的板塊上(Plate-fixed)。這代表在歐洲範圍內，ETRS89 坐標不會隨著板塊運動而改變(歐亞板塊之運動速率約為 2.5 cm/yr)。

ETRS89 的實現是由歐洲參考框架小組委員會(Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe, EUREF)負責定義、實現與維護的(Wikipedia, 2025; 官網: www.euref.eu)。EUREF 是國際大地測量學會(International Association of Geodesy, IAG)的小組委員會，是 IAG 第一委員會下屬的小組委員會。EUREF 利用所屬的 EUREF GNSS 基準網(EUREF Permanent GNSS Network, EPN)執行歐洲大地參考框架的定義與實現。EPN 的主要目標是維護歐洲大地基準(ETRS89)，並公開提供所有基準站的觀測數據、精確位置、速度量和對流層參數(Wikipedia, 2025)。

ETRF89 是該系統的初始實現版本。ETRF2000 是歐洲各國國家測繪機構(National Mapping Agencies, NMAs)最常採用的標準參考框架；其坐標固定於曆元 1989.0。隨著大地測量技術持續進步，EUREF 陸續發布更新的實現版本，例如 ETRF2005、ETRF2014 與 ETRF2020。每當全球 ITRF 更新時，便會推出相應的新版本，以維持更高的精度(Altamimi and Collilieux, 2024)。

雖然 ETRS89 將坐標系「鎖定」在歐亞大陸板塊上，讓全歐洲的製圖坐標保持「靜態」(不隨板塊運動漂移)，但實際上歐亞板塊並非完全剛體。歐洲部分區域存在顯著的內部地殼形變、地震以及冰河時期的後消退抬升。主要應用的形變模型可分為以下三大類：

1. 區域性「板塊內形變與速度模型」：這是 ETRF 最核心的形變修正機制。當科學家將全球動態的 ITRF 坐標轉換為歐洲本地的 ETRF 坐標時，會扣除歐亞板塊的整體旋轉，剩下的殘餘速度(Residual Velocities)就是板塊內部的形變。
2. 北歐冰河均衡調整模型：北歐(斯堪地那維亞半島及波羅的海)是全歐洲地殼形變最劇烈的地區。由於萬年前厚重的冰河消融，地殼至今仍以每年高達 1 公分的速度向上抬升(垂直變形)，並伴隨向外的水平擠壓。NKG_RF03vel / NKG2016LU 由北歐大地測量委員會(Nordic Geodetic Commission, NKG)開發的專門變形模型。北歐國家(如瑞典的 SWEREF99、芬蘭的 EUREF-FIN)在維護其國家的 ETRF 實現時，強制嵌入此變形模型。將不同年份(Epoch)觀測到的 GNSS 坐標，精準校正回國家法律規定的標準基準元(例如將 2026 年的觀測值扣除形變，還原到 1993.0 的標準位置；Lidberg et al., 2017)。
3. 全球 ITRF 基礎震後變形模型：由於 ETRF 的數學定義是衍生自全球大地參考框架(ITRF)，因此 ITRF 內建的變形模型也會直接傳承到最新的 ETRF2020 中。在希臘、義大利等構造活躍的南歐地中海地區，大地震後地殼會持續數年

產生非線性的鬆弛形變。最新的 ETRF2020 完整引入了 ITRF2020 的 PSD 對數與指數形變方程，用以修正地震引起的測站軌跡變形(IGN, 2022)。

(三) 日本

日本國土地理院(The Geospatial Information Authority of Japan, GSI)負責日本國家測繪基準之維護，於官方英文網站彙整了一系列關於新日本大地基準的英文論文(Bulletin of GSI, 2004)，系統性說明其基準發展概念。這些論文內容包含：

- Preface (Kazuo Komaki)
- Concept of the New Japanese Geodetic System (Shoichi MATSUMURA, Masaki MURAKAMI, Tetsuro IMAKIIRE)
- Realization of Horizontal Geodetic Coordinates 2000 (Hiromichi TSUJI and Shigeru MATSUZAKA)
- JGD2000(vertical) -The New Height System of Japan- (Tetsuro IMAKIIRE and Eiichi HAKOIWA)
- Development of a New Japanese Geoid Model, "GSIGEO2000" (Hiroyuki NAKAGAWA, Kojin WADA, Tadayuki KIKKAWA, Hisao SHIMO, Hisashi ANDOU, Yuki KUROISHI, Yuki HATANAKA, Hiromi SHIGEMATSU, Kazuyuki TANAKA, Yoichi FUKUDA)

日本第一個現代化、以地心為基準的大地參考框架起始於 2002 年 1 月 1 日公布的 2000 日本大地基準(Japan Geodetic Datum 2000, JGD2000)。JGD2000 使用新的、現代化的 GRS80 橢球體，並且對齊了國際地球參考框架 ITRF94 (參考時刻 1997.0)。其主要特點是取代了舊的東京基準(使用 Bessel 橢球體)，並且與全球定位系統 GPS (及後續之全球導航衛星系統 GNSS)標準接軌。

2011 年東日本大地震(地震規模 9.0)造成數公尺等級的大規模地表位移，導致 JGD2000 框架無法準確反映點位的真實位置。因此 GSI 於 2011 年 10 月 21 日更新大地基準為 JGD2011 並重新設定全國控制點坐標。JGD2011 之定義亦改為對齊於 ITRF2005 (參考時刻 2011.0)。

因持續之板塊運動、地震與火山活動，導致日本全國每年有數公分的地殼變動。至 2020 年時，JGD2011 的坐標已出現明顯誤差。因此 GSI 於 2025 年 4 月 1 日發布新的 JGD2024 大地測量成果，並將其基準更新為 ITRF2014 (參考時刻 2020.0)。由於全面將控制點坐標重設至 2020.0 時刻，縮小 GNSS 實測數據與控制點官方坐標的差距，可提升防災應用、基礎建設與科學觀測的精度，以及與全球觀測的一致性。

在實務面，GSI 發布了 JGD 2024 成果，其描述文字為：「電子參考點、三角測量點、水準測量點等的高程結果已根據衛星定位修訂為“大地測量結果 2024”，並於 2025 年 4 月 1 日發布。在此次修訂中，為了消除由於地殼運動而累積的高程結果差異，使用最新的衛星定位、高程觀測資料和新的大地起伏模型「2024 日本及週邊地區大地水準面(JPGEO2024)」計算了截至 2024 年 6 月 1 日(曆元週期)的高程結果」(GSI, 2025)。此外，GSI 亦發布了有關 2025 年正高修訂成果，並提供因應地質

變化所需的時變轉換資訊(GSI, 2026)。

伴隨著 JGD 2024 之發布，GSI 亦提供了三種補正(改正)網格檔，作為修正地殼變動影響之用。所謂的「穩定狀態改正」分為「定常時地殼變動補正」以及「半動態補正」兩種網格檔；而所謂的「非穩定狀態改正」則是針對地震以及火山活動所導致之地殼變動的補正(改正)，僅有一種網格檔。

GSI 針對板塊運動、大規模地殼運動(如慢滑、震後變形)、地層下陷等因素所造成之地表變形，提供「穩定狀態改正」機制。該機制共包含兩類補正策略(GSI, 2023)：

定常時地殼變動補正：改正範圍涵蓋全日本，網格檔每 3 個月更新一次。此策略之主要特色為直接將 JGD 與國際地球參考框架 ITRF 相連接，因此可用於輔助日本 Centimeter Level Augmentation Service (CLAS)與精密單點定位(PPP)等服務，使其定義在 ITRF 的定位成果能夠與 JGD 接軌。GSI 提供相關之線上服務，稱作 POS2JGD (<https://positions.gsi.go.jp/cdcs/>)。該服務能提供地殼變動補正量，進行 ITRF 坐標與 JGD2024 坐標之間的轉換，目前在日本被廣泛應用於自駕車、無人機、高精地圖等高精度即時定位應用上。

半動態補正：改正範圍涵蓋全日本，網格檔每年更新一次。此策略主要用於修正 JGD 點位坐標，因非均勻地殼運動隨時間造成的變形影響。GSI 同樣有提供對應之線上服務，稱作 SemiDynaEXE (GSI, 2013)。該網站提供在 JGD 框架下，不同觀測時刻之間的坐標轉換，目前在日本主要是使用於測量用途。

GSI 亦在大規模地震及火山活動後提供「非穩定狀態改正」機制，以修正地震/火山所導致之地殼變動。非穩定狀態改正網格的涵蓋範圍較小，僅限於受到地震/火山影響之地區，但網格點之密度較高。

(四) 澳洲

澳洲政府於 2020 年公告一個新的靜態坐標參考框架，稱為 2020 澳洲大地基準(Geocentric Datum of Australia 2020, GDA2020) (ICSM, 2024)。同時也公布一個時變參考框架，稱為 2014 澳洲地球參考框架(Australian Terrestrial Reference Frame 2014, ATRF2014)，也就是採用雙框架大地基準並行的策略(ICSM, 2020)。根據雙框架之定義，GDA2020 與 ATRF2014 都是根據 ITRF2014 所建立，且參考時刻均為 2020.0，但是 GDA2020 控制點的坐標是固定在 2020.0，而 ATRF2014 的控制點坐標則會隨著時間變化。這代表兩個框架的控制點坐標在 2020.0 時刻是重合的，隨即兩者間產生差異，且差異量隨著時間增加而逐漸擴大，而此隨著時間間隔增加而逐漸擴大的差異量就是澳洲板塊運動(Australian Plate Motion)位移量。澳洲雙框架策略的最大特色是同時採用一個靜態參考框架以及一個時變參考框架以滿足不同使用者的需求，並維持與國際地球參考框架 ITRF 同步一致。由於澳洲的國土均位於同一板塊內(澳洲板塊)，地殼變動形式較為單純。

ATRF2014 建立在 ITRF2014 的基礎上，核心設計目的是為了追蹤澳洲板塊的移動。只採用了澳洲板塊的歐拉向量(Euler vector)定義板塊內部的運動，即相對於澳洲板塊運動的框架。這使得澳洲的地理坐標(緯度、經度)隨時間變動最小化，適用於地籍測量和導航。總結而言，ATRF2014 將 ITRF2014 的整體框架「固定」

在澳洲板塊上，也就是只更新和使用該板塊自身的板塊運動模型。雖然 ATRF2014 與 ITRF2014-PMM 的目標一致，但 ATRF2014 採用了更密集的局部測站進行優化。以下是澳洲板塊運動參數（旋轉速率）的具體數值對比：

1. 根據 Geoscience Australia 採用的模型，澳洲板塊運動的旋轉速率參數數值 (rad/Ma) 為繞 X 軸旋轉速率 $\omega_X = 0.0066782$ 、繞 Y 軸旋轉速率 $\omega_Y = 0.00690013$ 、繞 Z 軸旋轉速率 $\omega_Z = 0.00945952$ ，這些參數換算後，代表澳洲板塊每年約向東北方向移動 7 公分，並伴隨約 0.012 角秒的旋轉。
2. ITRF2014-PMM 是一個全球性模型，其澳洲板塊的歐拉極位置如下：緯度($\varphi = 32^\circ.94 \pm 0^\circ.05$)、經度 ($\lambda = 37^\circ.70 \pm 0^\circ.12$)、角速度 ($\omega = 0^\circ.624 \pm 0^\circ.001$)。與 ATRF2014 核心差異在於數據來源密度，ITRF2014-PMM 使用全球分佈的少數測站；而 ATRF2014 使用了 APREF 網絡，包含澳洲境內及周邊數百個 GNSS 測站，在區域內精度更高。ATRF2014 模型下測站的水平殘差通常小於 1 mm/yr，更能真實反映澳洲板塊內部的剛性運動。

關於 ATRF2014，還有兩件議題需要澄清。一是關於 ATRF2014 與 APREF 間的關係，另一個則是 14 參數轉換的形式。

ATRF2014 與 APREF

簡單來說，ATRF2014 的澳洲板塊參數本質上就是 APREF 研究成果的「官方標準化版本」。兩者是數據源（APREF）與基準定義（ATRF2014）的關係。APREF 是一個區域性的 GNSS 觀測網絡和協作計畫，負責處理來自澳洲及亞太地區約 500 個測站的數據，並產出高精度的「速度場 (Velocity Field)」數據。ATRF2014 是澳洲官方定義的動態參考框架，採用了 APREF 的運算結果，將其標準化為 3 個歐拉旋轉參數，亦即前述的 ω_X 、 ω_Y 、 ω_Z ，作為澳洲全國統一使用的板塊運動模型 (PMM)。

相較於全球性的 ITRF2014-PMM（僅使用全球約 30 多個澳洲相關站點），APREF 使用了澳洲境內更密集的測站（含 ARGN 和 AuScope 網）。研究顯示，基於 APREF 的模型能使澳洲測站的水平殘差控制在 1 mm/yr 以內，比全球模型更精確地反映了板塊內部的剛性運動。ATRF2014 雖然以 APREF 為基礎，但做了一定程度的「平滑」與「標準化」，以確保在進行 GDA2020（靜態）與 ATRF（動態）轉換時，全澳洲的座標變換具有法規上的一致性。

需要補充說明的是 APREF 的現況，雖然計畫的範圍與現有觀測網涵蓋整個亞太地區，包括歐亞板塊 (Eurasian Plate)、太平洋板塊 (Pacific Plate)、菲律賓海板塊 (Philippine Sea Plate)、巽他板塊 (Sunda Plate)、印度板塊 (Indian Plate)，並產出這些站點的精確速度場 (Velocity Solutions)，但是「板塊運動模型 (PMM)」的官方應用與開發，在現階段主要集中在澳洲板塊 (Australian Plate) 的優化。

14 參數轉換的形式

如在 ITRF 討論中所述，14 參數轉換是在更換框架定義時使用，在同一框架定義中 ITRF2020 主要使用 PMM，ATRF2014 亦然。由於 ATRF2014 定義於 ITRF2014，

其架構本身不包含傳統 ITRF 框架間的 14 參數轉換，而是透過澳洲板塊運動模型 (PMM) 來處理不同曆元間的位移。然而在實務計算中，此模型常以 14 參數相似轉換的形式實現，根據 GDA2020 技術手冊 (ICSM, 2024) Table 3.3，定義了由 ATRF2014/ITRF2014 轉換至 GDA2020 之參數（如表 2），平移與尺度速率為零，僅保留旋轉速率。需注意此處之旋轉速率為正值，其數學意義在於抵消澳洲板塊隨時間累積的位移量。據此，ATRF2014 與 GDA2020 之間的坐標轉換，實務上可視為透過 14 參數相似轉換完成。

表 2 ATRF2014 至 GDA2020 之 14 參數轉換係數值

參數	數值 ($t_0 = 2020.0$)	年變化速率
平移 (Translation)	0	0
尺度 (Scale)	0	0
X 旋轉 (Rotation)	0	0.00150379"/yr
Y 旋轉 (Rotation)	0	0.00118346"/yr
Z 旋轉 (Rotation)	0	0.00120716"/yr

註：本表係數專用於 ATRF2014 → GDA2020 之坐標變換。旋轉參數單位為角秒 (arcseconds, ")；($1'' = 1000 \text{ mas}$)。根據板塊運動模型 (PMM)，澳洲板塊相對於 ITRF2014 之 R_z 運動速率原為 -1.2032 mas/yr ，而在執行此方向之坐標轉換時，參數需取其反向值以抵消位移。 $1 \text{ mas (毫角秒)} = 4.84813681 \times 10^{-9}$ 弧度。

(五) 紐西蘭

由於紐西蘭位於板塊交界處，地殼變動劇烈且地震頻繁，因此紐西蘭政府自 2000 年起即採用所謂的半動態基準 (semi-dynamic datum) 技術，建立 2000 紐西蘭大地基準 (New Zealand Geodetic Datum 2000, NZGD2000)，作為國家坐標參考框架。在 NZGD2000 中，控制點坐標僅有在參考時刻 (reference epoch) 是固定不變的，在其他時刻的控制點坐標則是可以使用參考時刻的公告坐標以及一個變形模型 (deformation model) 加以推算出來。相較於傳統靜態框架，NZGD2000 的控制點坐標精度可以顯著地維持較長的時間 (Blick & Grant, 2010)。

NZGD2000 的變形模型包含三項 (Land Information New Zealand, 2016)：

1. 長期速度場：這部分描述紐西蘭整體及區域性的板塊運動速度，也就是座標隨時間持續漂移的趨勢。
2. 區域性形變修正：有些地區的變形不是均勻的，例如活動斷層附近、造山帶、板塊邊界等，所以模型會加入區域性的變形資訊，而不只是平均速度。
3. 地震後變形補償：紐西蘭近代地震頻繁，重大地震後常會留下明顯的永久位移或緩慢衰減的後續變形，因此模型也包含地震後形變修正區塊，用來處理這類非線性變化。

上述各國大地基準之比較統整於表 3 (內政部，2026)。

表 3 各國大地基準比較

	美國	歐盟	澳洲	紐西蘭	日本
命名	NATRF2022 PATRF2022 CATRF2022 MATRF2022	European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)	ATRF2014 時變框架； GDA2020 靜態框架	NZGD2000 (New Zealand Geodetic Datum 2000)；半動態基準	JGD2024
說明或未來	*將取代 NAD83 *架構於 ITRF2020 (2020.0) *四個板塊固定參考框架 (PFTRFs)\ *架內速度場模型(Intra-Frame Velocity Model, IFVM)	EUREF 利用下屬的 GNSS 基準網 (EUREF Permanent GNSS Network, EPN)來執行歐洲大地基準的維護與實現		*架構於 ITRF96，參考時刻為 2000.0 *NZGD2000 使用一個變形模型 (deformation model)來修正板塊運動造成的位移影響	*水平坐標保持與 JGD2011 一致。 *公告電子參考站、三角測量點、水準測量點等的高程結果
備註			雙框架		

四、結 語

由於目前我國法定大地基準 TWD97 在起始時刻對齊 ITRF，屬於靜態基準，難以有效因應控制點坐標隨時間變化之衝擊，從而使得 TWD97 必須不斷更新版本，以反映基本控制點持續位移的情況。然而，頻繁的更新大地基準容易導致實用上的困難，特別是對於地籍測量、土地行政等需要長期穩定性的業務而言。

因此本研究之建議作法為採用「雙框架策略」，以因應 TWD97 所遭遇之困境。除繼續維護及使用 TWD97 靜態基準，同時效法澳洲之雙框架策略，以區域性加密國際地球參考框架 ITRF 方式建立一個與 ITRF 同步的臺灣時變參考框架(Taiwan Terrestrial Reference Frame)，簡稱 TTRF。有關 TTRF 之命名，為彰顯時變特性，本文建議使用「臺灣時變參考框架」。該名稱與英文名稱是否應採用「Taiwan Time-dependent Reference Frame」則仍有待後續討論彙整意見。

在雙框架策略下，使用者可依測繪任務選擇使用控制點坐標固定不變的 TWD97 靜態基準或控制點坐標隨時間改變的 TTRF 時變框架。例如土地複丈、建物測量等較小範圍業務可能適合繼續使用 TWD97 基準，而基本控制測量與加密控制測量等較大範圍業務可能適合使用 TTRF 框架進行控制測量觀測數據平差計算分

析，之後再利用地殼變位模型將平差計算所得成果轉換回 TWD97 [內政部國土測繪中心(2025a)]。

為執行 TTRF 與 TWD97[2020]之坐標轉換，必須建立適用於臺灣地區的地殼變形模型。澳洲的作法為使用板塊運動模型 PMM，PMM 主要透過 14 參數的 Helmert 轉換實現，並在部分地區可能會套用變形模式。但由於澳洲的地殼變動型態較為單純且不受大規模地震影響，因此並不適合直接使用於臺灣。相反地，臺灣的地質狀況類似日本，兩地均位於板塊碰撞地帶且大規模地震發生頻率較高，因此日本採用的方式，應更具有參考性。本專刊中，楊名等(2026)陳述在此一議題上之現有成果。

五、致 謝

本文承蒙兩位評審提供極具建設性之建議，對內涵與可讀性助益甚大，謹此致謝。同時，謹此向 FIG Commission 5.2 共同主席 Dr. Chris Pearson 致謝，在臺灣時變框架的發展實務中，Dr. Pearson 的經驗與學識，以及友善、無私的分享，貢獻卓著。Chris 於 FIG 2026 開幕前，5 月 20 日，在 Cape Town 辭世。謹此深致哀悼。

六、後 記

本文內容為文件之蒐集與整理，並非創作型學術論文，謹此敘明。本文編寫過程中曾使用 ChatGPT (GPT-5.5, OpenAI)、Perplexity (Version 4.1)、Claude Sonnet 4.6 與 Google Gemini 協同作業，包含蒐集資料、比對文件、潤飾文字。

參考文獻

內政部，2026，「114 年度國家測量基準整合研究案第 3 期成果報告」。

楊名、史天元、陳國華、許懷謙、李依璇、蔡秉翰、蕭世民、陳鶴欽、梁旭文，2026，臺灣大地基準雙框架策略：構想與初步成果，國土測繪與空間資訊期刊，審稿中。

Altamimi, Z., L. Métivier, P. Rebischung, X. Collilieux, K. Chanard, J. Barnéoud, 2023, ITRF2020 plate motion model. *Geophysical Research Letters*, 50(24), e2023GL106373.

Altamimi, Z., P. Rebischung, X. Collilieux, L. Métivier, K. Chanard, 2023, ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. *Journal of Geodesy*, 97, 47. <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01738-w>.

Altamimi, Z., X. Collilieux, 2024, EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and European Terrestrial Reference Systems. EUREF Governing Board, Paris: IGN. <http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1-Mar-04-2024.pdf> (Last Checked 2026/06/03)

- Blick, G., D. Grant, 2010, The implementation of a semi-dynamic datum in New Zealand - Ten years on. In: FIG Congress 2010, Sydney, Australia.
- Bulletin of GSI Vol.51, 2004, https://www.gsi.go.jp/ENGLISH/page_e30185.html(Last Checked 2026/06/12)
- Donnelly, N., G. Blick, R. Stanaway, 2013, Dynamic datums and the implementation of deformation models. FIG/IAG/UN-GGIM-AP Reference Frame in Practice Technical Seminar, Rome, Italy, Nic Donnelly | Geodetic Surveyor, Land Information New Zealand, https://www.fig.net/resources/proceedings/2013/2013_reference_frame_in_practice_comm5/2.3_dynamic_datums_donnelly.pdf(Last Checked 2026/04/30)
- GSI, 2013, SemiDynaEXE Ver.1.0.1. <https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/semidyna/web/index.html>(Last Checked 2026/06/12)
- GSI, 2023, プレート運動による地殻変動の補正（定常） 導入背景と補正概要. https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/chikakuhendo_background.html(Last Checked 2026/06/12)
- GSI, 2025, 「測地成果 2000」、「測地成果 2011」及び「測地成果 2024」. <https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/jgd2000-2011.html>(Last Checked 2026/06/12)
- GSI, 2026, プレート運動による地殻変動の補正（定常）. <https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/semidyna.html>(Last Checked 2026/06/12)
- ICSM, 2020, ATRF technical implementation plan v2.3. Available at: https://www.icsm.gov.au/sites/default/files/2020-02/ATRF%20Technical%20Implementation%20Plan%20v2.3_1.pdf.
- ICSM, 2024, GDA2020 technical manual v1.8. Available at: https://www.icsm.gov.au/sites/default/files/GDA2020%20Technical%20Manual%20V1.8_published_0.pdf.
- IERS Bulletin C Guide. <https://hpiers.obspm.fr/eoppc/bul/bulc/BULLETC.GUIDE>, (Last Checked 2026/06/12)
- IERS Website. <https://www.iers.org/IERS/EN/Organization/About/Objectives/objectives>, (Last Checked 2026/06/12)
- IGN, 2022, ITRF2020P: Equations of post-seismic deformation models. Available at: <https://itrf.ign.fr/ftp/pub/itrf/itrf2020/ITRF2020-PSD-model-egs-IGN.pdf>
- IOGP, 2026, Coordinate conversions and transformations including formulas, International Association of Oil & Gas Producers, IOGP Report 373-07-2 – EPSG Guidance Note

- 7, part 2. <https://www.iogp.org/bookstore/product/coordinate-conversions-and-transformation-including-formulas/>(Last Checked 2026/04/30)
- ITRF Website. https://itrf.ign.fr/docs/solutions/itrf2020/Transfo-ITRF2020_TRFs.txt(Last Checked 2026/06/12)
- Lidberg, M., J. Ågren, H. Steffen, 2017, On the use of crustal deformation models in the management of ETRS89 realizations in Fennoscandia, FIG Working Week 2017, https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2017/ppt/ts04c/TS04C_lidberg_agren_et_al_9131_ppt.pdf(Last Checked 2026/06/04)
- Land Information New Zealand, 2016, New Zealand Geodetic Datum 2000 Deformation Model, <https://www.linz.govt.nz/guidance/geodetic-system/coordinate-systems-used-new-zealand/geodetic-datums/new-zealand-geodetic-datum-2000-nzgd2000/new-zealand-geodetic-datum-2000-deformation-model>(Last Checked 2026/06/04)
- NGS, 2021, Blueprint for the modernized NSRS, part 3: working in the modernized NSRS, NOAA technical report NOS NGS 67. Available at: https://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/NOAA_TR_NOS_NGS_0067.pdf.
- Oppenheim, A. V., A. S. Willsky, 1997. *Signals and Systems (2nd ed.)*. Prentice Hall.
- Petit, G., B. Luzum, 2010, IERS Conventions (2010), IERS Technical Note No. 36, IERS Conventions Centre, https://iers-conventions.obspm.fr/packaged_versions/iersconventions_v1_0_0.tar.gz(Last Checked 2024/10/08)
- Poutanen, M., P. Häkli, 2018, Future of national reference frames – from static to kinematic? *Geodesy and Cartography*, 65(2), 213–225, <https://doi.org/10.24425/118697>, <https://journals.pan.pl/Content/103265/PDF/art08.pdf>(Last Checked 2026/04/30)
- Ronen, H., G. Even-Tzur, 2017, Kinematic datum based on the ITRF as a precise, accurate and lasting TRF for Israel. Survey of Israel. *Journal of Surveying Engineering*, 143(4), 04017013.
- UN-GGIM, 2016, Geodesy (Global Geodetic Reference Frame GGRF), <https://ggim.un.org/knowledgebase/knowledgebasecategory37.aspx>(Last Checked 2024/10/07)
- Wikipedia, 2024a, International Celestial Reference System and its realizations, https://en.wikipedia.org/wiki/International_Celestial_Reference_System_and_its_realizations(Last Checked 2024/10/07)
- Wikipedia, 2024b, International Terrestrial Reference System and Frame, https://en.wikipedia.org/wiki/International_Terrestrial_Reference_System_and_Frame(Last Checked 2024/10/07)

Wikipedia,2025,Regional reference frame sub-commission for Europe (EUREF).
Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Regional_Reference_Frame_Sub-Commission_for_Europe.

Wikipedia, 2026,Time-variant system, https://en.wikipedia.org/wiki/Time-variant_system(Last Checked 2026/04/30)

高程基準與高程系統研析與建議

郭重言^{1*}、李啓民²、史天元³、楊名⁴、吳俊毅⁵、鄧淳中⁶

論文收件日期：115.04.29

論文修改日期：115.05.28

論文接受日期：115.06.22

摘 要

根據我國《國土測繪法》及《基本測量實施規則》，測量基準包括大地基準、高程基準、深度基準及重力基準，並分別配合相對應之參考系統，構成國家測繪之基本準據。我國現行法定高程基準為二〇〇一臺灣高程基準(TaiWan Vertical Datum 2001, TWVD2001)，並已建立重力法大地起伏模型(TWGEOID2014)與混合法大地起伏模型(TWHYGEO2014)，作為高程轉換與高程現代化之技術基礎。隨著全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)技術發展與高程現代化推動，國際間高程系統已逐步由傳統水準網導向以GNSS橢球高結合大地起伏模型計算正高之模式，並持續朝向物理一致性更高之重力法大地起伏模型發展。本文整理我國高程基準與高程系統現況，說明重力法與混合法大地起伏模型之建置與差異，並比較美國、歐盟、日本、澳洲及紐西蘭之高程基準發展趨勢，同時介紹美國NAPGD2022之制度與技術架構。綜合比較顯示，混合法大地起伏模型較有利於銜接既有工程成果與現行高程系統，重力法大地起伏模型則較具物理一致性、跨區域整合能力與長期發展潛力。考量臺灣位處板塊活動及地層下陷顯著區域，GNSS與水準測量之時空一致性對幾何大地起伏與混合法大地起伏模型精度具有關鍵影響，因此本文進一步提出GNSS與水準測量同步施測之必要性與分區分級作業建議。綜合制度延續性、工程實務需求及國際高程現代化趨勢，本文建議我國採行TWVD2001與GNSS結合重力法大地起伏模型並行之雙系統模式，並配合重啟海、陸、空重力測量、建立垂直速度場模型及完善新舊基準轉換機制，以作為未來高程現代化推動之方向。

關鍵詞：GNSS、高程基準、高程現代化、混合法大地起伏模型、重力法大地起伏模型、水準測量。

^{1*} 教授，國立成功大學測量及空間資訊學系，TEL:(06)2757575 # 63826，Email: kuo70@mail.ncku.edu.tw。

² 助理教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

³ 榮譽退休教授，國立陽明交通大學土木工程學系。

⁴ 教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

⁵ 科長，內政部地政司。

⁶ 科員，內政部地政司。

Review and Recommendations for Vertical Datums and Height Systems

Chung-Yen Kuo^{1*}, Chi-Ming Lee², Tian-Yuan Shih³, Ming Yang⁴, Chun-Yi Wu⁵, Chun-Chung Teng⁶

Abstract

According to Taiwan's National Land Surveying and Mapping Act and its related regulations, the national surveying framework consists of the geodetic datum, vertical datum, chart datum, and gravity datum, together with their corresponding reference systems. Taiwan's current legal vertical datum is the TaiWan Vertical Datum 2001 (TWVD2001), and the technical basis for height conversion and height modernization has been established through the gravimetric geoid model TWGEOID2014 and the hybrid geoid model TWHYGEO2014. With the rapid development of Global Navigation Satellite System (GNSS) techniques and the worldwide trend of height modernization, many countries have gradually shifted from traditional leveling-based height determination toward GNSS ellipsoidal heights combined with geoid models, and further toward gravimetric geoid models with stronger physical consistency. This paper reviews Taiwan's present vertical datum and vertical system, explains the development and characteristics of gravimetric and hybrid geoid models, and compares the modernization strategies adopted in the United States, Europe, Japan, Australia, and New Zealand. The framework and technical implications of the U.S. NAPGD2022 are also introduced. The comparison indicates that hybrid geoid models are more practical for maintaining compatibility with existing engineering applications and legacy vertical systems, whereas gravimetric geoid models provide stronger physical consistency, better regional integration capability, and greater long-term potential. Because Taiwan is located in an area of active crustal deformation and significant land subsidence, the temporal consistency between GNSS and leveling observations is crucial for the accuracy of geometric geoid determination and hybrid geoid modeling. Therefore, this paper further discusses the necessity of synchronous GNSS and leveling observations and proposes a graded operational strategy based on regional deformation conditions. Considering institutional continuity,

^{1*} Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University, TEL : +886-6-2757575 #63826 · E-mail: kuo70@mail.ncku.edu.tw.

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

³ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology.

⁴ Professor Emeritus, Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University.

⁵ Section Chief, Department of Land Administration, Ministry of the Interior.

⁶ Officer, Department of Land Administration, Ministry of the Interior.

engineering practice, and international development trends, this study recommends that Taiwan adopt a dual-system framework in which TWVD2001 is maintained in parallel with a GNSS-based orthometric height system supported by a gravimetric geoid model. To support future height modernization, this framework should be accompanied by renewed terrestrial, airborne, and marine gravity surveys, the establishment of a vertical velocity model, and the development of transformation mechanisms between the old and new vertical systems.

Keywords: GNSS, Gravimetric geoid, Height modernization, Hybrid geoid, Leveling, Vertical datum.

一、前言

高程基準與高程系統是國家測繪體系的重要組成，直接影響工程建設、地形測圖、災害監測、海岸管理及空間資訊整合之品質。傳統上，許多國家以潮位站平均海水位作為水準零點，再透過全國水準網聯合平差建立法定正高高程基準和高程系統。然而，隨著地殼變動、長距離水準網誤差累積、區域系統偏差與新一代 GNSS 橢球高觀測技術普及，既有正高高程系統面臨與物理重力等位面不一致、維護成本高及更新速度慢等問題。因此各國開始推動高程現代化，將正高高程求定由單純依賴水準測量，轉向 GNSS 橢球高結合混合法大地起伏模型；其後，部分國家更進一步採用 GNSS 橢球高結合重力法大地起伏模型，以建立兼具物理一致性、空間一致性與時效性的高程基準和系統 (NGS, 2021)。實際上，混合法大地起伏模型可藉由 GNSS/水準資料銜接既有水準高程系統與工程成果，適合實務高程轉換；重力法大地起伏模型則主要依據重力觀測、全球重力場模型與地形改正建立，較具物理一致性與長期發展潛力。因此，兩者並非單純替代關係，而是可形成兼顧工程連續性與物理一致性的雙系統架構。

我國現行法定高程系統仍採「二〇〇一臺灣高程基準」(TaiWan Vertical Datum 2001, TWVD2001)，並已建立重力法大地起伏模型與混合法大地起伏模型，其中混合法大地起伏為橢球高與正高轉換之技術基礎。然而，在板塊活動、地層下陷與垂直變動顯著的臺灣環境下，如何在維持現有法定正高高程系統成果穩定性的同時，逐步引入 GNSS 與重力法大地起伏模型的新制度，仍是一項值得深入評析的重要課題。本文旨在檢視 TWVD2001、重力法與混合法大地起伏模型之功能定位，參考國際高程現代化發展經驗，並提出適合臺灣之高程基準更新與雙系統並行策略。

二、我國測量基準與系統現況

根據我國《國土測繪法》第一章第 3 條及《基本測量實施規則》第二章第 5 條至第 9 條，測量基準包括大地基準、高程基準、深度基準及重力基準四大類，並分別配合坐標系統、高程系統、深度系統及重力系統等參考系統作為基本控制測量依據。此框架顯示我國測量基準並非僅限於單一高程系統，而是涵蓋陸域與海域、幾何定位與物理位勢等多個層面，構成完整之國家測繪基準體系。

高程基準主要定義高程零點及其所對應之參考面，而高程系統則為實現與應用該基準之高程表示方式。臺灣水準點高程採正高系統，高程基準定義於 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境下，採用基隆潮位站 1957 年至 1991 年之潮汐資料化算而得，命名為「二〇〇一臺灣高程基準」(TaiWan Vertical Datum 2001, TWVD2001) (內政部國土測繪中心, 2026)。TWVD2001 以基隆潮位站長期平均海水位為水準零點，並透過一等水準網平差成果建立之正高系統，作為目前工程建設、地籍測量、地形測量及公共建設等作業之法定高程依據。(劉啟清, 1998)在考量長周期如海水面上升等多項因素影響下，利用回歸模式計算 1990 年 1 月 1 日之平均海水面，而非算術平均潮位資料求得平均海水面。TWVD2001 水準網之等級分布與點位密度、現行精密水

準測量之精度規範以及工程應用等請參考內政部國土測繪中心網頁(內政部國土測繪中心，2026)。

三、我國大地起伏模型與現行高程轉換

臺灣內政部於 103 年公告臺灣地區大地起伏模型成果，目前可區分為重力法大地起伏模型與混合法大地起伏模型兩類。重力法大地起伏模型 (TWGEOID2014) 係依據地面重力測量、空載重力測量、船載重力測量及衛星測高重力資料，結合高解析度數值地形模型 (Digital Elevation Model, DEM)，並採用最小二乘配置法 (Least Squares Collocation, LSC) 與 Stokes 積分法整合建置而成。該模型以全球重力場 EGM2008 為長波長基準，並輸出 30 秒×30 秒網格(內政部，2014)。然而，重力法大地起伏模型僅依重力資料計算，與實際水準正高高程系統 TWVD2001 之間仍可能存在系統性偏移和傾斜。上述差異可能源自潮位站零點定義、水準網誤差累積、地殼垂直變動、重力資料與 DEM 誤差，以及既有高程系統參考面與重力等位面之間的不一致。

為提高與現行高程系統 TWVD2001 之相容性，進一步建置混合法大地起伏模型 (TWHYGEO2014)。其做法係以重力法大地起伏模型為基礎，透過 GNSS 與水準聯合觀測資料計算幾何(觀測)大地起伏，建立重力法大地起伏與幾何大地起伏之差異修正面，再據以修正形成 TWHYGEO2014。換言之，TWGEOID2014 重力法大地起伏模型代表由重力場決定的物理大地起伏面，較偏向物理一致性的重力等位面；而 TWHYGEO2014 混合法大地起伏模型則進一步整合 GNSS/leveling 幾何大地起伏，主要是為了讓 GNSS 橢球高能轉換到與 TWVD2001 一致的正高系統，使其在既有工程與測量應用上更具便利性。

四、國際高程基準與高程現代化發展

(一) 美國

美國現行高程基準為 1988 北美垂直基準(North American Vertical Datum of 1988, NAVD88)，係以加拿大魁北克省 Rimouski 潮位站平均海水位為水準零點，透過水準網聯合平差建立。NAVD88 雖已改採單一潮位站定義水準零點，已修正其前身 1929 美國國家大地垂直基準(National Geodetic Vertical Datum of 1929, NAVD29)因 26 站潮位站約制而造成之變形問題，但依美國國家大地測量局 (National Geodetic Survey, NGS) 評估，NAVD88 相對於最新全球大地起伏模型，仍約存在 0.5 m 的整體偏移(bias)，且美國東岸至西岸約呈現 1 m 左右的傾斜(tilt) (NGS, n.d.)。

為取代 NAVD88 及美國國家空間參考系統(National Spatial Reference System, NSRS)既有垂直基準，美國 NGS 推動 2022 北美—太平洋大地位基準 (North American-Pacific Geopotential Datum of 2022, NAPGD2022)，以純重力法建置之 GEOID2022 大地起伏為核心，結合 GNSS 橢球高即可直接推算正高。其建構核心資料來自美國垂直基準重新定義重力計畫(Gravity for the Redefinition of the American

Vertical Datum, GRAV-D)之空載重力測量，並對應 ITRF2020 參考框架。為協助新舊基準過渡，NGS 亦發展新版 VERTCON 供 NAVD88 與 NAPGD2022 正高轉換之用 (NGS, 2021)。

(二) 歐盟

歐盟地區高程系統統一化主要由歐洲參考框架小組委員會 (Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe, EUREF) 推動之歐洲垂直參考系統 (European Vertical Reference System, EVRS) 與其實現框架 (European Vertical Reference Frame, EVRF) 負責。透過歐洲聯合水準網 (United European Levelling Network, UELN) 之觀測與平差，歐洲已逐步建立 EVRF2000、EVRF2007 與 EVRF2019。現行 EVRF2019 採零潮汐系統 (zero-tide system)，並以 Amsterdam Ordnance Datum (NAP) 為高程基準面，對應 1989 歐洲地球參考系統 (European Terrestrial Reference System 1989, ETRS89) 大地坐標 (Sacher and Liebsch, 2024)。

為配合 GNSS 高程現代化，歐洲亦同步建置重力法 (似) 大地起伏模型 (Gravimetric (Quasi) Geoid)，例如 2015 歐洲重力法似大地起伏模型 (European Gravimetric Geoid 2015, EGG2015) (Denker, 2015)，是以 GRS80 橢球與零潮汐系統為基準，其數值明確與 EVRF2007 相容。EUREF 文件指出 EGG 系列 (含 EGG2015) 以一參數擬合到 EVRS (包含 EVRS 最新的實現 EVRF2019)，但目前尚未列為法定高程基準 (EUREF, 2024)。然而，相關文獻指出，目前尚無全歐統一的混合法大地起伏模型，僅有各國建置之國家版本，例如德國 GCG2016 和法國 RAF20 等 (International Service for the Geoid, n.d.)。EUREF 目前規劃建立一套與 EVRS 官方高程參考面一致之歐洲似大地起伏模型，且必須與最新之 EVRS 與 ETRS89 實現 (目前為 EVRF2019 與 ETRF2020) 保持一致，此模型將命名為歐洲高程參考面 (European Height Reference Surface, EHRS) (EUREF, 2024; 2025)。與美國發展方向不同，對於歐洲規劃中的 EHRS 而言，GNSS／水準控制點資料集不只是有幫助而已，EUREF 更明確將其稱為新系統的「主要基石之一」。這表示該控制點資料集實際上扮演了研究等級之洲尺度似大地起伏模型與官方作業用高程參考面之間的橋梁。其邏輯相當清楚，若缺乏品質良好的 GNSS／水準控制點，固然仍可計算出一個重力法似大地起伏模型；但卻無法有足夠信心地將其轉化為一個可被信賴、可供正式作業使用的洲尺度高程轉換面 (Schwabe *et al.*, 2025)。

(三) 日本

日本前一代高程系統係以東京灣平均海水位 (Tokyo Peil, TP) 為水準零點之 Japan Geodetic Datum 2011 (JGD2011) (vertical) height 系統，並提供混合法大地起伏模型 GSIGEO2011，係由重力法大地起伏模型 JGEOID2008 與 971 個 GNSS／水準站觀測大地起伏，以最小二乘同化方式求得。自 2025 年 4 月起，日本轉向以 GNSS 測量為基礎之高程系統，現行 JGD2024 公告的是「Geoid 2024 Japan and Surroundings」(JPGeo2024)，以及 2024 的修訂正高成果，隨後並公告多個控制點正高修正檔案

(Geospatial Information Authority of Japan, 2026)，並以 2024/06/01 為高程參考時刻。自 2025/04/01 起官方測量與高程成果全面改用 JPGeo2024 結合 GNSS 橢球高求得；若在指定離島使用，再依 Hrefconv2024 來加上基準面改正量；並可搭配 GSI 提供之定常時地殼變動補正系統 POS2JGD 及相關半動態補正模型，達成高度隨時間變化的準動態管理；此外，PatchJGD(三角點標高版)則提供 JGD2011 與 JGD2024 之間正高成果的轉換功能。

JPGeo2024 是將重力法大地起伏模型 JGeo2024 由無潮汐系統(tide-free system)轉換為平均潮汐系統(mean-tide system)，也就是由 $W0=62,636,853.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 轉換成與東京灣平均海水位一致。而 JGeo2024 是僅根據重力資料(空載重力、地面重力、船載重力、海底重力、衛星重力等)建構的重力大地水準面。透過空載重力測量，現已收集到過去缺乏的山區和沿海地區的重力數據；另外透過利用 2016 日本重力標準網(Japan Gravity Standardization Net 2016, JGSN2016) 解決了地面重力資料觀測日期舊和位置資訊精度低的問題，進而將重力大地水準面的精度提高到約 3 cm。由於其不採用水準測量成果，因此不包含地殼運動影響與水準測量累積誤差。日本此一制度轉型，顯示其高程體系已由傳統水準網模式，轉向「重力法大地起伏模型+GNSS+時變改正」之新架構。

(四) 澳洲

澳洲官方高程基準是澳洲高程基準(Australian Height Datum, AHD)，主要包括 1971 年於澳洲本土實施之 AHD71 及 1983 年應用於塔斯馬尼亞地區之 AHD-TAS83，均屬以潮位站平均海水位為水準零點，經由水準網聯合平差所建立之正常正高系統(normal-orthometric height)。AHD 之基準原以 30 個潮位站之 1966 至 1968 年平均海水位建立，然而建置時未納入地區性重力異常與地殼變動修正，因此相對於似大地水準面存在約 1 m 的南北向傾斜，以及約 0.5 m 的區域扭曲 (Featherstone *et al.*, 2011)。在 GNSS 技術普及後，澳洲逐步發展 AUSGeoid 系列模型，並於 2020 年啟用 AUSGeoid2020，搭配 GDA2020 共同使用，以提供 GNSS 橢球高轉換至 AHD 正常正高之功能。

然而，AUSGeoid2020 為混合法似大地起伏模型，強制擬合至水準測量成果，仍可能繼承 AHD 既有之偏差與扭曲。為克服此限制，澳洲另提出 Australia Vertical Working Surface (AVWS)，使用 Australia Gravimetric Quasigeoid 2020 (AGQG2020) 作為重力法似大地起伏模型，其模型不確定度約為 4-8 cm，優於 AUSGeoid2020 的約 6-13 cm，為不受 AHD 誤差影響之替代性高程作業面。AVWS 不用於取代 AHD，而是替代性高程參考，特別適合 >10 km 距離的跨區域作業。AUSGeoid2020 和 AGQG2020(AVWS)兩者在澳洲陸域普遍相差約 -1 ~ +1 m。此一制度反映澳洲目前亦採近似雙系統之發展邏輯，即 AHD 維持法定基準地位，而 AVWS 提供較具物理一致性之替代性高程參考。

(五) 紐西蘭

紐西蘭過去各地獨立水準網所定義之地方性垂直基準 (Local Vertical Datums, LVDs) 之間存在顯著差異, 南北島正常正高落差最大可達 50 cm, 且許多早期基準點未持續維護, 導致高程資料缺乏一致性。為改善此問題, 紐西蘭曾公告 New Zealand Vertical Datum 2009 (NZVD2009), 取代原有 13 個地方性垂直基準。NZVD2009 以 2009 紐西蘭似大地水準面 (New Zealand Quasigeoid 2009, NZGeoid2009) 為參考面, 透過 2008 年地球重力模型 (Earth Gravitational Model 2008, EGM2008), 結合陸地和衛星重力觀測以及 DEM 計算而得。然 NZGeoid2009 仍存在局限性, 例如重力資料覆蓋不均, 且與舊 LVDs 間轉換的偏移模型過於簡化等。

後續紐西蘭土地資訊局 (Land Information New Zealand, LINZ) 於 2016 年建置並公告 2016 紐西蘭垂直基準 (New Zealand Vertical Datum 2016, NZVD2016), 來取代 NZVD2009。NZVD2016 以 2016 紐西蘭似大地水準面 (New Zealand Quasigeoid 2016, NZGeoid2016) 為參考面, NZGeoid2016 為重力法似大地起伏模型, 結合全球重力場模型 (Eigen-6c4)、重力資料、DEM 建置而成, 並採用零潮汐系統 (zero-tide system)。該基準與 NZGD2000 整合, 使用者可透過 GNSS 橢球高配合 NZGeoid2016 推算正常正高, 實現無需水準測量作業即可獲得全國統一之正常正高成果。NZVD2016 為目前紐西蘭法定高程基準, 廣泛應用於工程設計、空間資訊、災害應變與土地管理等領域 (Toitū Te Whenua Land Information New Zealand, n.d.)。

圖一為橢球高、正高、正常正高、大地起伏與高程異常之幾何關係圖。表一為各國高程基準現況與未來發展比較。本節比較美國、歐盟、日本、澳洲與紐西蘭之高程基準和高程現代化發展, 目的除了介紹各國制度外, 並藉由檢視其既有高程基準問題、新模型或新制度之建立方式、舊系統保留與否、新舊基準轉換工具, 以及時變或半動態改正之應用, 歸納其對臺灣高程基準和高程系統更新之啟示。其中, 日本經驗對地殼活動顯著地區之時變高程管理具直接參考價值; 澳洲以法定 AHD 與 AVWS 並行之模式, 而日本也以法定 JGD2024 和舊有國家水準網繼續維持之並行模式, 兩者則可作為臺灣推動雙系統架構之重要參考。

五、美國 NAPGD2022 介紹

為因應原先規劃 2022 年取代 NAVD88 及 NSRS 中所有其他垂直基準的規劃, 美國 NGS 透過多個管道 (特別是於 2010 年、2015 年及 2017 年舉辦的三場地理空間高峰會) 收集使用者意見。於 2016 年及 2017 年間, NGS 在回應使用者意見並考量科學原則與公共利益管理 (stewardship) 之平衡下, 進行了多次內部與外部的辯論與討論, 以期嚴謹定義原規劃將於 2022 年啟用之新大地位基準 (geopotential datum)。

NAPGD2022 屬於 NSRS 的大地位基準。該基準涵蓋三個區域: 北美-太平洋地區、關島、北馬里亞納群島 (Guam and Commonwealth of Northern Mariana Islands) 以及美屬薩摩亞 (American Samoa), 提供一致之大地起伏、垂直偏差、重力異常及其他與重力場相關之大地坐標資訊。NAPGD2022 由四大模型組成, 包括 GEOID2022、DEFLEC2022、GRAV2022 與 GM2022, 皆以 ITRF2020 及 GRS80 橢球體為基準。

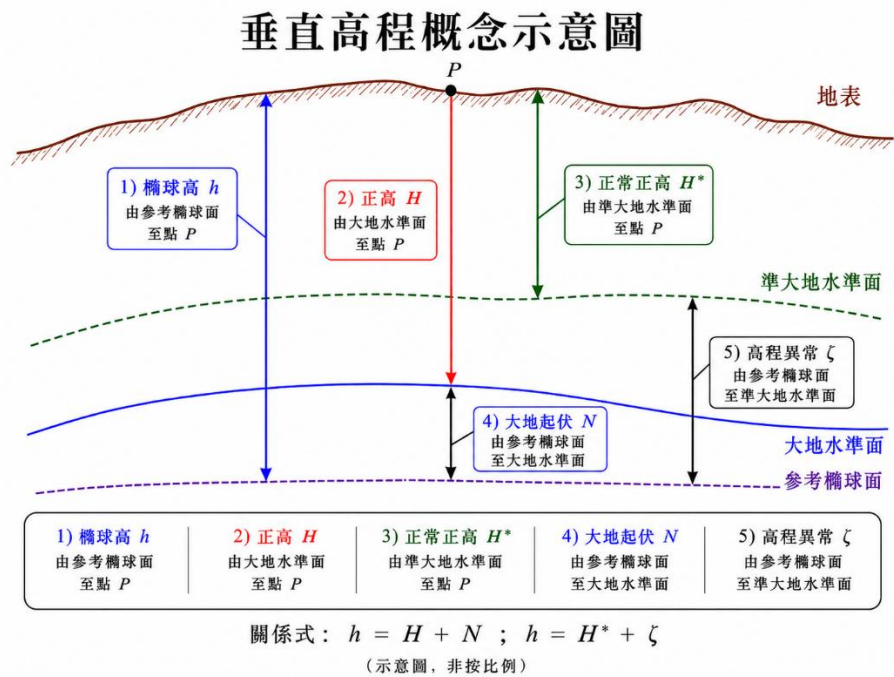


圖 1 高程系統示意圖

表 1 各國高程基準比較

	美國	歐盟	澳洲	紐西蘭	日本
命名	North American Vertical Datum of 1988(NAVD 88)；正高	European Vertical Reference Frame 2019 (EVRF2019)；正常正高	Australian Height Datum 71 (AHD71) and AHD-TAS83；正常正高	New Zealand Vertical Datum 2016 (NZVD2016)；正常正高	JGD2024；正高
說明或未來	「North American-Pacific Geopotential Datum of 2022」(NAPGD2022) 包含重力法大地起伏模型 GEOID2022，將取代 NAVD88	例如 European Gravimetric Geoid 2015(EGG2015)，為重力法(似)大地起伏模型 (Gravimetric (Quasi) Geoid ^{*2})	[*] AUSGeoid2020 為混合法似大地起伏模型，為 AHD71 參考面。 [*] Australia Vertical Working Surface(AVWS)使用 Australia Gravimetric Quasigeoid2020 (AGQG2020) 重力法似大地起伏模型	NZVD2016 中的 NZGeoid2016 為重力法大地起伏，可轉換 NZGD2000 橢球高到 NZVD2016 正常正高	JGD2024 中的 JPGeo2024 為重力法大地起伏， W_0 為東京灣的平均海平面

備註*			雙系統		國家水準網 目前會繼續 維護
-----	--	--	-----	--	----------------------

*正常高系統：代表國家為中國，其官方採用的「1985 國家高程基準」，實質上即為基於青島驗潮站資料推算而得的正常高系統。

GEOID2022 為重力法大地起伏模型，是 NAPGD2022 的零正高基準面(Wang, 2022)，屬無潮汐系統(tide-free system)，提供了 GNSS 橢球高與正高間的轉換關係，正高(H)將透過 GNSS 之橢球高(h)與 GEOID2022 之大地起伏(N)取得： $H = h - N$ 。GEOID2022 的空間解析度為 1 弧分(arcminute)，包含靜態模型(SGEOID2022)與動態模型(DGEOID2022)兩個部分，DGEOID2022 用以描述大地起伏時間的變化；GEOID2022(其 SGEOID2022 部分)在參考曆元 2020.00 最佳貼合全球平均海水位(Global Mean Sea Level, GMSL； $W_0 = 62,636,856.00 \text{ m}^2/\text{s}^2$)，GMSL 變動使門檻達 20 公分(約等於 W_0 變化超過 $\pm 2 \text{ m}^2/\text{s}^2$)時，將重新公告新大地位基準。水準測量在 NAPGD2022 中保留提供高精度相對高差之角色，但絕對高程之存取以 GNSS 橢球高搭配 GEOID2022 為主。GEOID2022 模型精度經由 Geoid Slope Validation Survey(GSVS)三條約 300 km 的基線驗證，平坦沿海的 GSVS11 約可達 1 cm 的差分大地起伏精度，中等地形的 GSVS14 約為 2 cm，山區 GSVS17 約為 3–5 cm 等級，顯示納入 GRAV-D 空載重力後能顯著提升，尤其是沿海與重力變化劇烈區域。DEFLEC2022 是從 GEOID2022 大地起伏模型推導之配套產品，用以表示指定位置之垂線偏差(Deflections of the Vertical, DoV)。GRAV2022 則提供所需位置之重力值，其使用資料集與 GEOID2022 相同。GRAV2022 提供完整之重力異常，可用於水準測量改正、動態高程推算及其他應用。GM2022 為全球重力場模型，提供時變化之球諧係數(至 2190 階、2190 次)，對應之空間解析度約為 5 arcminutes，允許使用者計算地球表面任一地點重力場相關參數。

需要注意的是，NGS 目前已透過 Federal Register 公告更新時程：modernized NSRS(包含 NATRF2022 與 NAPGD2022)預計於 2025–2026 年間分階段於 beta.ngs.noaa.gov 釋出並測試，待完成至少六個月的整體評估後，再由 FGCS 表決正式採用，取代現行 NAD 83 與 NAVD 88。

六、我國雙系統模式之合理性

重力法與混合法大地起伏模型之差異，首先體現在物理一致性。重力法大地起伏模型之 W_0 取自物理重力等位面，較有利於對接全球或區域一致之參考位勢；混合法則因擬合既有水準網成果， W_0 易受水準網形變、系統誤差與區域傾斜影響。換言之，重力法較接近以重力位定義之物理參考面，而混合法則較接近「既有高程系統的實務延伸」。

在與 TWVD2001 一致性方面，重力法模型可能呈現系統偏差與傾斜，但這並不一定是模型錯誤，而是反映 TWVD2001 水準零點定義及網形誤差與物理重力等位面之間的差異；混合法則直接擬合 TWVD2001 參考面，因此在工程端應用與既

有成果一致性上最為有利。就新一代垂直基準而言，重力法較容易銜接國際高程參考框架，例如 International Height Reference System (IHRIS)／International Height Reference Frame (IHRF)，亦較利於陸海無縫整合；混合法則屬區域性高程系統，跨國整合與對接時通常仍需額外轉換與校正。

在工程使用層面，混合法大地起伏模型因可直接對齊既有高程成果，對既有工程成果、驗收流程與法規制度的衝擊最小，因此短期內最為友善；重力法大地起伏模型則在使用者端需先建立新的高程轉換與作業觀念，一旦相關標準作業程序 (Standard Operating Procedure, SOP) 與模型服務機制成熟，其作業面可更具一致性與可持續性。另一方面，混合法高度依賴 GNSS／leveling 控制點之品質與分布，也較容易把不同年代觀測資料差異與地表沉陷／抬升效應納入修正面；重力法則較不容易將水準網扭曲直接寫入模型，對水準網誤差的敏感度相對較低。然而重力法大地起伏模型成果仍受全球重力場模型、本地與海域重力資料品質、DEM 與地形改正、潮汐系統、參考橢球與參考位勢 W_0 選擇，以及 Stokes 積分、移去—計算—恢復或最小二乘配置等近似方法影響。另外在高山與海岸地區，重力資料不足、地形起伏劇烈及密度假設誤差，均可能造成公分至公寸等級之不確定性。

水準測量一直以來被認為是在 50 公里範圍內，決定正高差最精確的方法 (Smith et al., 2013)。然而，當距離超過此範圍後，水準測量誤差累積將接近，甚至與 GNSS 橢球高與大地起伏模型推算之正高差的總誤差量級相當 (NGS, 2021)。日本、美國、紐西蘭等國逐步採行以 GNSS 橢球高結合重力法大地起伏模型決定正高的作法可 1. 有效解決地殼變形長期累積所導致之水準測量成果與實際正高間的差異；2. 透過 GNSS 與重力法大地起伏模型，正高可較傳統水準測量更快速取得，進而提昇工程施工的效率與生產力，並強化災後重建與復原的即時性 (GSI 以平成 28 年熊本地震為例，相較於水準測量需 5 個月完成測量，GNSS 加上大地起伏模型只需 1 個月時間)；3. 大幅降低水準測量由原點向外傳播的累積誤差。4. 解決水準參考面相對於大地水準之整體偏差、東西或南北向傾斜以及區域性扭曲變形，讓正高高程系統參考面回歸真正物理重力等位面特性。

綜合考量我國地理環境特性、測量法規政策與作業實務現況，本文建議採用「雙系統」模式，平行提供全國 TWVD2001 與 GNSS 結合重力法大地起伏模型正高系統。此一模式的第一個優點，在於可維持現況高程系統與既有工程成果之延續性，降低對現有使用者之衝擊，並避免立即全面修正相關法規與作業規範。第二個優點，則在於可符合國際高程現代化發展趨勢，並提供產官學界緩衝時間，逐步建立新舊基準轉換、應用方法與工程作業指引。此外，若未來要完善與精進重力法大地起伏模型之建置，本文建議比照美國與日本，同步重啟我國海、陸、空重力測量。從制度設計角度來看，雙系統模式並非意味著完全保留舊制、拒絕新制，而是將法定高程成果穩定性與新一代高程基準現代化服務機制並行發展，形成一個兼顧過渡期需求與長期物理一致性的制度框架。

此外，雙系統並行仍存在若干制度與技術管理挑戰。首先，TWVD2001 為傳統水準網成果，而 GNSS／重力法大地起伏模型正高則依賴 GNSS 橢球高、大地水準

面模型、重力資料、幾何大地起伏品質，兩者在局部地區可能存在系統性差異。其次，使用者於工程設計、地籍測量等相關應用時，若未明確標示高程來源與基準，可能造成不同成果之混用。第三，兩套系統需建立明確之轉換關係、適用範圍、精度說明及更新機制，否則將增加資料維護與成果管理成本。因此，本文建議未來應進一步建立兩系統差異圖、區域性轉換模型、成果標示規範與使用指引，以降低高程成果混用之風險，並作為後續高程基準現代化之過渡機制。

七、GNSS 與水準同步施測之必要性與分級作業

隨著全球導航衛星系統(GNSS)技術的發展，國際間積極推動高程現代化(height modernization)，以簡化傳統水準網維護作業，提升垂直基準一致性，並支援工程建設、災害監測及海平面變化研究。為實現上述目標，建置能夠直接將 GNSS 橢球高換算為水準網正高之混合型大地起伏模型(hybrid geoid model)成為必要之基礎工作。混合型大地起伏模型的建立除了需要可靠的重力大地起伏外，還仰賴精確的幾何(觀測)大地起伏： $N = h - H$ ，其中 h 為 GNSS 觀測橢球高， H 為水準觀測正高。

臺灣位於地殼活躍變動區域，地震活動及地層下陷現象頻繁，地殼垂直變動速率可達數公分每年(Ching et al., 2011)，導致地表高程隨時間變化。若 GNSS(橢球高)與水準(正高)施測時間間隔過久，將造成推算幾何大地起伏之誤差，影響混合型大地起伏模型之精度。因此，有必要於同一時間窗口內同步進行 GNSS 與水準觀測，以降低地殼垂直變形對幾何大地起伏精度之影響，尤其是地表垂直變動較大區域，例如臺灣西南部地層下陷區域。而(NGS, 2021)報告書中也指出「The most reliable method will be to use GNSS to determine orthometric heights on points near the leveling survey at the time of the leveling survey itself」，明確建議 GNSS 與水準測量宜於可能情況下同步施作，以確保觀測資料之時空一致性。

依水利署地層下陷監測資訊整合服務系統網頁內容，113 年最大下陷速率為雲林地區的 7.0 cm/yr，而內政部公告之 103 年臺灣地區大地起伏模型成果，與特選 14 條路線計 214 點(All)資料整體精度評估，大地起伏差值(ΔN)最大值 18.7 cm、最小值 -5.6 cm、平均值 0.8 cm、標準差 3.1 cm、均方根誤差 3.2 cm。其中台 17 線西南沿岸路線精度評估， ΔN 最大值 4.5 cm、最小值 -3.5 cm、平均值 0.2 cm、標準差 1.9 cm、均方根誤差 1.9 cm。若 GNSS 和水準測量非同時量測，量測時間差超過 1.9 cm/7.0 cm/yr=0.27yr=3.26 月，則地殼變動量即超過模型精度。另外若暫不考慮水準測量之系統性誤差，且正高的不確定度相對較小，即其整體精度主要由 GNSS 垂直定位精度決定，因此 GNSS 所觀測之橢球高精度須達 2 公分內。(Bazanowski 等人, 2019)以採礦變形監測網為例，顯示若要在 95%信賴度下達到次公分等級高程精度，GNSS 靜態觀測時間需約 12 小時。若假設 GNSS 定位橢球高誤差高達 1 公分，利用誤差傳播計算之地殼變動量不得超過 1.6 cm，故在臺灣下陷嚴重區測量時間差不得超過 2.7 個月，然而，地殼較穩定區域可適度放寬此限制。

綜合上述，建議可將測區區分為不同等級。於地層下陷顯著之嚴重變形區(例如垂直變形量 $\geq 5-7$ cm/yr 之雲林、彰化沿海地區)，GNSS 與水準測量之時間差宜嚴

格控制在約 3 個月以內；中度變形區(約介於 1–3 cm/yr)，適度放寬 GNSS 與水準觀測之時間差至約 6–12 個月；至於地表相對穩定區(≤ 1 cm/yr)，可容許 GNSS 與水準觀測間有 1–2 年之時間差；以上係以 GNSS 與水準測量因時間差造成之地表變動量不超過 1.5 cm 為原則；若需提高精度，則可再縮短時間差。最後配合既有 GNSS、InSAR、水準建立垂直速度場模型，將觀測結果推算至共同參考曆元(epoch)。對需進行同步觀測之點位，建議於水準點旁透空處設置臨時副點進行 GNSS 測量，再經精密水準測量作業量測副點與水準點間之正高差。

GNSS 與水準同步施測不僅有助於降低幾何大地起伏受地表垂直變形影響之程度，提升混合法大地起伏模型之可靠性，亦可作為重力法大地起伏模型之外部檢核資料，並提供建立新舊高程基準轉換模型之重要控制依據。

八、結論與建議

我國現行高程系統以 TWVD2001 為法定高程基準，並已具備 TWGEOID2014 與 TWHYGEO2014 兩類大地起伏模型作為高程轉換與高程現代化之技術基礎。由國際發展經驗可知，美國、日本、澳洲與紐西蘭皆已逐步由傳統水準網主導之高程制度，轉向以 GNSS 橢球高結合大地起伏模型計算正高之模式，並持續朝向重力法大地起伏模型、曆元管理、新舊基準轉換及時變改正等方向發展。此一趨勢顯示，高程現代化並非單純之技術更新，而是涉及基準定義、資料架構、作業流程及制度設計之整體調整。就我國情況而言，混合法大地起伏模型可有效銜接現行 TWVD2001 及既有工程成果，於短中期內較具實務可行性；相對地，重力法大地起伏模型則具有較佳之物理一致性、跨區域整合能力及長期發展潛力，更有利於與國際高程參考框架接軌。基於兩者功能定位不同，本文建議我國未來高程制度不宜採取單一路徑取代，而應建立兼顧法定高程系統延續性與高程現代化需求之雙系統架構。亦即，在維持 TWVD2001 作為既有法定與工程作業高程系統之同時，逐步發展以 GNSS 橢球高結合重力法大地起伏模型計算正高之新服務機制，作為未來高程現代化之主體方向。

此外，臺灣位於地殼活躍變動區域，地震活動、地層下陷及區域性垂直形變顯著，使 GNSS 與水準測量之觀測曆元一致性成為建立混合法大地起伏模型與幾何大地起伏之關鍵條件。本文建議，於嚴重變形區應嚴格控制 GNSS 與水準施測時間差，並依地表垂直變形程度採分區分級作業，同時結合既有 GNSS、InSAR 與水準資料建立垂直速度場模型，將觀測成果歸算至共同曆元。若未來要進一步推動高程現代化，除應完善新舊基準轉換、工程應用指引與相關法規配套外，亦宜比照美國與日本，逐步重啟海、陸、空重力測量，以提升重力法大地起伏模型精度與服務能力。整體而言，採行 TWVD2001 與 GNSS 結合重力法大地起伏模型並行之雙系統模式，應屬現階段兼具務實性、過渡性與前瞻性的可行方向。

綜合而言，建議我國高程現代化可採分階段推動，首先維持 TWVD2001 作為現行法定與工程作業高程系統，以確保既有成果之延續性，並同步辦理 GNSS 與水準測量，以建立高精度幾何大地起伏資料及混合法大地起伏模型；其次強化重力法

大地起伏模型之建置與驗證，包含更新重力資料、DEM 與地形改正資料；再者，建立新舊高程基準轉換模型與垂直速度場模型，以處理地殼變動與地層下陷對高程成果之影響；最後，逐步建立 GNSS 橢球高結合重力法大地起伏模型推算正高之服務機制，並配合法規、工程應用指引與使用者教育訓練，形成兼具制度延續性與物理一致性的雙系統架構。

誌 謝

本研究由內政部計畫「114 年度國家測量基準整合研究案」(114PC040801A)經費支援，使本研究得以順利完成，特此申謝。

參考文獻

- 內政部，2014，公告 103 年臺灣地區大地起伏模型成果（台內地字第 1030178307 號），《行政院公報》。
- 內政部國土測繪中心，2026，高程控制，<https://www.nlsc.gov.tw/cp.aspx?n=1483>(最近檢索時間 2026 年 6 月 20 日)。
- 劉啟清，1998，台灣地區驗潮站長期監測資料之計算及高程基準網之建立工作，內政部。
- Bazanowski, M., A. Szostak-Chrzanowski, and A. Chrzanowski, 2019, Determination of GPS Session Duration in Ground Deformation Surveys in Mining Areas, *Sustainability*, 11(21), 6127.
- Ching, K.E., M.L. Hsieh, K. M. Johnson, K.H. Chen, R.J. Rau, and M. Yang, 2011, Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling measurements and continuous GPS observations, 2000-2008, *Journal of Geophysical Research*, 116, B08406.
- Denker, H., 2015, A new European gravimetric (quasi)geoid EGG2015. Poster presented at XXVI General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), Earth and Environmental Sciences for Future Generations, 22 June – 02 July 2015, Prague, Czech Republic.
- EUREF Working Group, 2024, European Unified Height Reference. Charter Draft v2.0_2024-05-17. Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG), Available at:https://evrs.bkg.bund.de/SharedDocs/Downloads/EVRS/EN/Publications/CharterDraft_EUREF_WG.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- EUREF Symposium 2025, 2025, EUREF Symposium 2025 Abstract Book (June 25 – 26, 2025, Covilhã, Portugal). University of Beira Interior, <https://euref2025.segal.ubi.pt/wp-content/uploads/2025/06/EUREF-SYMPOSIUM-ABSTRACT-BOOK-FINAL.pdf>
- Featherstone, W. E., Kirby, J. F., Hirt, C., Filmer, M. S., Claessens, S. J., Brown, N. J., ... and Johnston, G. M., 2011, The AUSGeoid09 model of the Australian height datum.

Journal of Geodesy, 85(3), pp.133-150.

Geospatial Information Authority of Japan, 2026, 全国の標高成果の改定 [Revision of nationwide elevation survey results],

<https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/hyoko2024rev.html>

International Service for the Geoid,n.d., Regional Models by list. Politecnico di Milano, Available at: https://www.isgeoid.polimi.it/Geoid/reg_list.html(Last Checked 2026/06/20).

NGS (n.d.), *New datums: Replacing NAVD 88 and NAD 83*. National Oceanic and Atmospheric Administration, Available at:

<https://geodesy.noaa.gov/datums/newdatums/index.shtml>(Last Checked 2026/06/20).

NGS, 2021, *Blueprint for the Modernized NSRS, Part 2: Geopotential Coordinates and Geopotential Datum*, NOAA Technical Report NOS NGS 64, Available at:

https://www.ngs.noaa.gov/library/pdfs/NOAA_TR_NOS_NGS_0064.pdf

Sacher, M., and G. Liebsch, 2024, *EVRF2019 as new realization of EVRS*, Available at:

https://www.bkg.bund.de/SharedDocs/Downloads/EVRS/EN/Publications/EVRF2019_FinalReport.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Schwabe, J., Sacher, M., et al., 2025, Status report for the EUREF Working Group “European Unified Height Reference” . Presented at the EUREF Symposium 2025, Covilhã.

Smith, D.A., S.A. Holmes, X. Li, S. Guillaume, Y.M. Wang, B. Bürki, D.R. Roman, and T. Damiani, 2013, Confirming regional 1 cm differential geoid accuracy from airborne gravimetry: the Geoid Slope Validation Survey of 2011. *Journal of Geodesy*, 87(10 – 12),pp.885-907.

Toitū Te Whenua Land Information New Zealand ,n.d., *Vertical datums*, Available at:

<https://www.linz.govt.nz/guidance/geodetic-system/coordinate-systems-used-new-zealand/vertical-datums> (Last Checked 2026/06/20).

Wang, Y. M., 2022, *Progress of GEOID2022* [Webinar]. National Geodetic Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration,

https://geodesy.noaa.gov/web/science_edu/webinar_series/progress-of-geoid-2022.shtml

臺灣大地基準雙框架策略：構想與初步成果

楊 名^{1*} 史天元² 陳國華³ 許懷謙⁴ 李依璇⁵ 蔡秉翰⁶ 蕭世民⁷ 陳鶴欽⁸

梁旭文⁹

論文收件日期：115.04.01

論文修改日期：115.05.05

論文接受日期：115.05.20

摘 要

臺灣法定坐標系統TWD97 (Taiwan Geodetic Datum 1997)，又稱為1997臺灣大地基準或一九九七坐標系統，是我國使用衛星定位測量技術並根據國際地球參考框架(International Terrestrial Reference Frame, ITRF)所建立的大地基準。TWD97屬於靜態基準，也就是控制點坐標是固定不變的。然而臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界，地殼變動型態複雜且劇烈，導致TWD97控制點的持續位移。為因應此問題，TWD97陸續發展出三種不同成果版本。然而過於頻繁的更新TWD97控制點坐標成果將會導致實用上的困難，特別是對於土地行政、地籍測量等需要長期穩定性的業務而言。國際間最新趨勢為各國開始發展控制點坐標隨時間改變(time-dependent)的國家時變參考框架，例如美國、澳洲、日本等國。本研究的主旨為探討如何運用雙框架策略有效因應臺灣地區控制點持續位移的問題。亦即在TWD97靜態基準之外，藉由區域性加密國際地球參考框架建立一個臺灣時變參考框架(Taiwan Terrestrial Reference Frame, TTRF)，並藉由發展臺灣地區地殼變位模型(crustal deformation model)，實現TTRF與TWD97[2020]之間的坐標轉換。根據2020至2024年臺灣地區的CORS觀測網數據，以及2024年國土測繪中心LiDAR技術更新數值地形模型案之加密控制測量觀測資料，初步成果顯示雙框架策略確實可有效因應地殼變動之影響，維護大範圍控制測量的成果品質。

關鍵詞：1997臺灣大地基準、坐標轉換、臺灣時變參考框架、雙框架策略、變位模型

^{1*} 教授，國立成功大學測量及空間資訊學系，TEL: +886-6-2757575 #63820，E-mail: myang@mail.ncku.edu.tw

² 榮譽退休教授，國立陽明交通大學土木工程學系

³ 教授，國立臺北大學不動產與城鄉環境學系

⁴ 博士生，國立成功大學測量及空間資訊學系

⁵ 碩士生，國立成功大學測量及空間資訊學系

⁶ 碩士生，國立成功大學測量及空間資訊學系

⁷ 專員，內政部國土測繪中心

⁸ 科長，內政部國土測繪中心

⁹ 簡任技正，內政部國土測繪中心

The dual-frame strategy for Taiwan Geodetic Datum: conceptualization and preliminary results

Ming Yang^{1*}, Tian-Yuan Shih², Kwo-Hwa Chen³, Huai-Chien Hsu⁴,
Yi-Hsuan Lee⁵, Bing-Han Tsai⁶, Shih-Min Hsiao⁷, He-Chin Chen⁸,
Hsu-Wen Liang⁹

Abstract

Taiwan Geodetic Datum 1997 (TWD97) -- also called 1997 coordinate system, is Taiwan's national datum based on the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) and established by using the GNSS positioning technique. However, Taiwan is located at the tectonic boundary of the Eurasia plate and Philippine Sea plate, with severe and complex crustal motion patterns. As a result, the TWD97 control points have shown severe and continuing displacements. To reflect the problem, TWD97 has developed three different versions. However, the update of TWD97 control point coordinates with excessive frequency is expected to cause difficulties for practical applications such as land administration and cadastral surveys, which require long-term stability. The latest trend for countries such as the United States, Australia, and Japan is to develop national time-dependent reference frames in which the coordinates of control points change over time. The objective of this study is to investigate how a dual-frame strategy can be effectively employed to address the issue of continuous displacement of control points in Taiwan. Specifically, in addition to the static TWD97 datum, Taiwan Terrestrial Reference Frame (TTRF) is established by regionally densifying the International Terrestrial Reference Frame. Furthermore, by developing a GNSS-based crustal deformation model, coordinate transformations between TTRF and TWD97[2020] can be achieved. Based on 2020-2024 CORS data collected in the Taiwan region, as well as densification control survey data from the 2024 National Surveying and Mapping Center LiDAR project, the preliminary results of this study indicate that the dual-frame strategy is effective in mitigating the

^{1*} Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University, TEL: +886-6-2757575 #63820, E-mail: myang@mail.ncku.edu.tw

² Professor Emeritus, Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University

³ Professor, Department of Real Estate and Built Environment, National Taipei University

⁴ Ph.D. student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

⁵ M.S. student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

⁶ M.S. student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

⁷ Specialist, National Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior

⁸ Section Chief, National Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior

⁹ Senior Technical Specialist, National Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior

楊 名、史天元、陳國華、許懷謙、李依璇、蔡秉翰、蕭世民、陳鶴欽、梁旭文：臺灣大地基準雙
框架策略：構想與初步成果

effects of crustal movement and maintaining the quality of control surveys over large areas.

Keywords: Coordinate transformation , Crustal deformation model , Dual-frame
strategy , Taiwan Geodetic Datum 1997 , Taiwan Terrestrial Reference Frame.

一、前言

1997臺灣大地基準或稱一九九七坐標系統(TWD97)係內政部於民國87年3月17日以台(87)內地字第8781107號函訂定，嗣於民國96年11月15日以台內地字第0960173460號令訂定基本測量實施規則。基本測量實施規則第6條並載明TWD97之地心坐標框架及參考橢球體分別依據國際地球參考框架(ITRF)以及國際大地測量與地球物理聯合會所定之參考橢球體(Geodetic Reference System 1980, GRS80)。

由於臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界，地殼變動型態複雜且大規模地震發生機率較高，導致TWD97基本控制點的位移情況顯著，並使得坐標參考框架必須不斷進行更新，以反映基本控制點持續位移的實際狀況。TWD97自建立以來已陸續發展出三種不同成果版本，分別為參考時刻訂於1997.0的TWD97 (依據ITRF94)、參考時刻訂於2010.0的TWD97[2010] (依據ITRF94)、及參考時刻訂於2020.0的TWD97[2020] (依據ITRF2014)，亦即平均約10年即必須進行更新。然而頻繁的更新控制點坐標容易導致實用上的困難，特別是對於地籍測量、土地行政等需要長期穩定性的業務而言，這也是目前TWD97所面臨的嚴峻挑戰。

二、國際發展趨勢

美國國家大地測量局(National Geodetic Survey, NGS)於2022年公布的現代化(modernized)國家空間參考系統(National Spatial Reference System, NSRS)包含了幾何坐標參考框架以及大地位勢基準兩個部分。在坐標參考框架方面，NSRS採用時變參考框架來減輕控制點坐標隨時間變化之衝擊。由於美國的國土幅員廣闊，涵蓋了4個板塊(tectonic plates)，故美國現代化國家空間參考系統包含了下列兩種要素(NGS, 2021)：

1. 隨著板塊運動的4個時變參考框架(Plate-Fixed Terrestrial Reference Frames)。
2. 框架內速度場模型(Intra-Frame Velocity Model, IFVM)：IFVM可以用來展現控制點坐標時間序列(圖1)，作為平差計算之先驗資訊和作為坐標轉換的工具(NGS, 2021)。

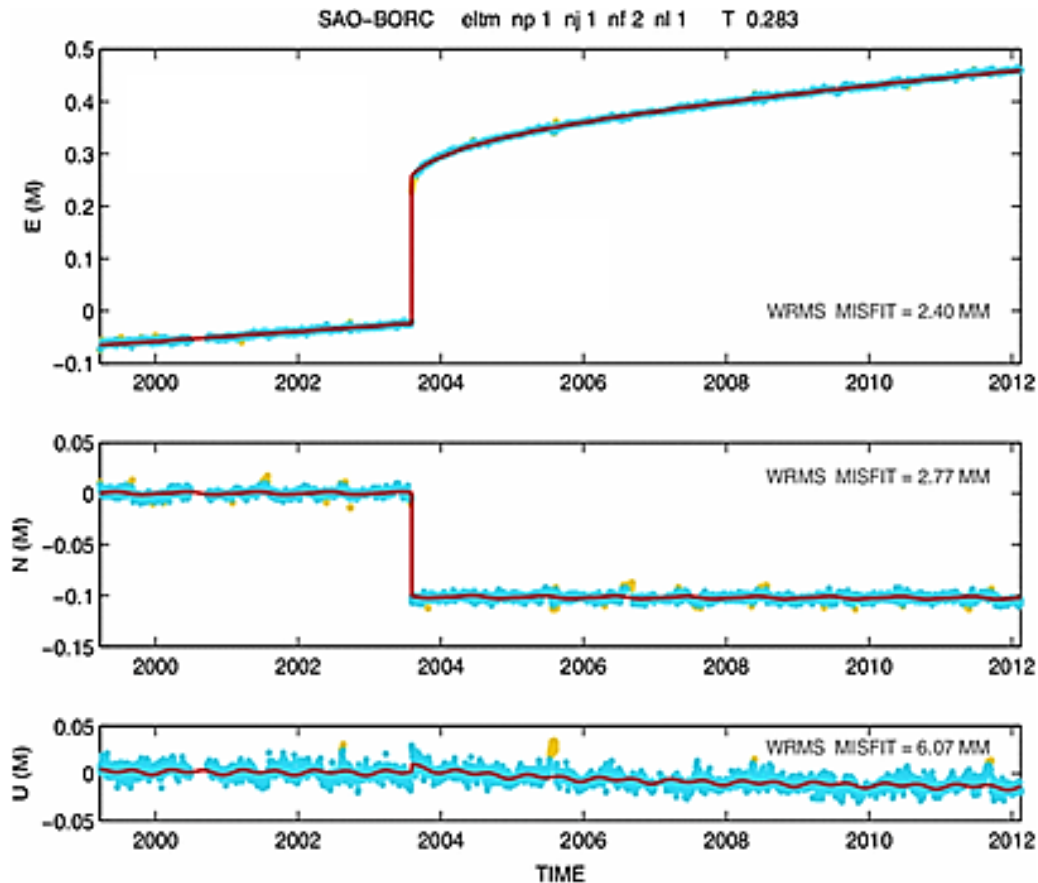


圖1 美國NSRS坐標時間序列函數範例(NGS, 2021)

澳洲政府於2020年公告新的靜態坐標參考框架，稱為GDA2020 (ICSM, 2024)，同時也公布一個時變參考框架，稱為ATRF2014，也就是採用雙框架基準併行的策略 (ICSM, 2020)。根據澳洲雙框架之定義，GDA2020與ATRF2014都是根據ITRF2014所建立且參考時刻均為2020.0，但是GDA2020控制點的坐標是固定在2020.0，而ATRF2014的控制點坐標則會隨著時間變化。這代表兩個框架的控制點坐標在2020.0時刻是重合的，隨即兩者間產生差異，且差異量隨著時間增加而逐漸擴大，而此隨著時間間隔增加而逐漸擴大的差異量就是定義在ITRF的澳洲板塊運動(Australian plate motion)位移量(圖2)。澳洲雙框架策略的最大特色是同時採用一個靜態參考框架以及一個時變參考框架來滿足不同使用者的需求，並維持與國際地球參考框架ITRF同步一致。由於澳洲國土均位於澳洲板塊內，地殼變動形式較為單純，因此ATRF2014與GDA2020之坐標轉換是利用14參數相似轉換(14-parameter similarity transformation)來達成的(圖3)。

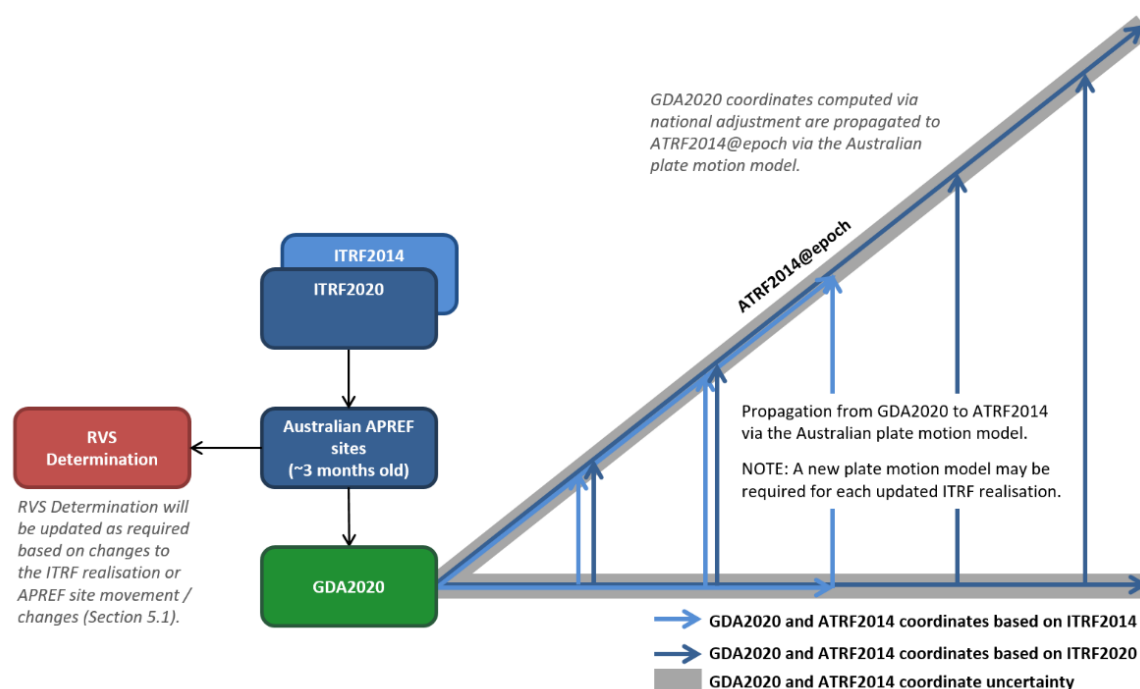


圖2 澳洲GDA2020及ATRF2014雙框架策略(ICS, 2020)

Government Australia **Geodetic Calculators**

2014 to GDA2020 Transform GDA2020 to ATRF2014 Batch Processing

Transform ATRF2014 to GDA2020

Use the Australian Plate Motion Model to transform an Australian Terrestrial Reference Frame 2014 (ATRF2014) geographic coordinate (latitude and longitude) to a Geocentric Datum of Australia 2020 provide the epoch of the ATRF2014 coordinate.

Coordinates at northern latitudes and eastern longitudes are positive, and those at southern latitudes and western longitudes are negative. Australia is located in the southern and eastern hemisphere.

Please note, that these results are only valid inside the extent of GDA2020.

Multiple coordinates can be transformed using the Batch Processing function at the link above.

Details of the Australian Plate Motion Model and the extent of GDA2020 can be found in the [Geocentric Datum of Australia 2020 Technical Manual](#).

Point Name: eg Flinders Peak (Optional - for display only)

Input Geographic Coordinate Notation: ☒ Decimal Degrees ☐ Degrees Minutes Seconds ☐ Degrees Decimal Minutes

ATRF2014 Latitude: -37.951033417°

ATRF2014 Longitude: 144.424867889°

ATRF2014 Ellipsoidal Height (in metres): 42.231m

ATRF2014 Epoch: 01/01/2020

Output Geographic Coordinate Notation: ☒ Decimal Degrees ☐ Degrees Minutes Seconds ☐ Degrees Decimal Minutes

Clear Submit

圖3 澳洲雙框架坐標轉換

(<https://geodesyapps.ga.gov.au/atrf2014togda2020>)

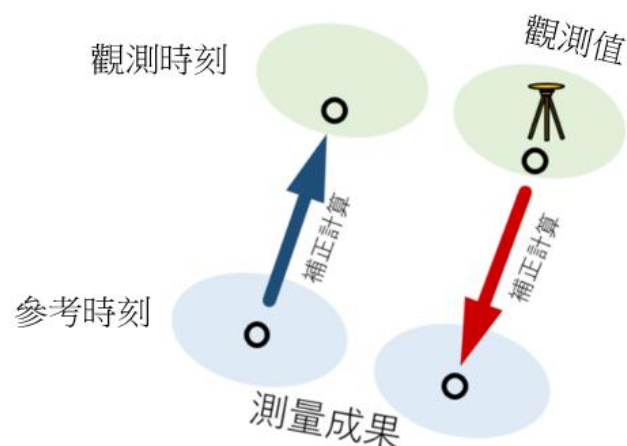
日本第一個現代化、基於地心的大地基準起始於2002年1月1日公布的2000日本大地基準(Japan Geodetic Datum 2000, JGD2000)。JGD2000使用新的、現代化的GRS80橢球體，並對齊了國際地球參考框架ITRF94 (參考時刻1997.0)。其主要特點是取代了舊的東京基準並與現代衛星定位測量技術接軌。

2011年東日本大地震(地震規模9.0)造成數公尺等級的大規模地表位移，導致JGD2000大地基準無法準確反映點位的真實位置。因此日本國土地理院(Geospatial Information Authority of Japan, GSI)於2011年10月21日更新大地基準為JGD2011並重新設定全國控制點坐標。JGD2011之定義亦改為對齊於ITRF2005(參考時刻2011.0)。

因持續之板塊運動、地震與火山活動，導致日本全國每年有數公分的地殼變動。至2020年時，JGD2011之公告控制點坐標已出現明顯誤差，因此GSI於2025年4月1日發布新的JGD2024大地測量成果，並重新對齊至ITRF2014 (參考時刻2020.0)。由於將控制點坐標全面設定至2020.0時刻，縮小了GNSS實測數據與控制點公告坐標的差距，因此可提升防災應用、基礎建設與科學觀測的精度，以及與全球觀測的一致性。伴隨著JGD2024之發布，GSI亦提供了不同的補正網格檔，作為修正地殼變動影響之用。所謂的「穩定狀態補正」包含「定常時地殼變動補正」以及「半動態補正」兩種網格檔；而所謂的「非穩定狀態補正」則包含針對地震以及火山活動導致之地殼變動補正網格檔。

GSI針對板塊運動、大規模地殼運動(如慢滑、震後變形)、地層下陷等因素造成之地表變形，提供「穩定狀態補正」機制，並包含兩類補正策略(https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/chikakuhendo_background.html)：

1. 定常時地殼變動補正：改正範圍涵蓋全日本，網格檔為每3個月更新一次(Yamashita et al., 2021)。此策略之主要特色為直接將JGD與國際地球參考框架ITRF相連接，因此可用於協助日本政府提供之公分級增強系統(Centimeter Level Augmentation Service, CLAS)與精密單點定位(Precise Point Positioning, PPP)等服務使用，使這些服務定義在ITRF的定位成果能夠與JGD接軌。GSI提供相關之線上計算服務，稱作POS2JGD (<https://positions.gsi.go.jp/cdcs/>)。此服務能提供地殼變動補正量，作為觀測時刻之ITRF坐標與參考時刻之JGD2024坐標間轉換使用(參考圖4)，目前在日本被廣泛應用於自駕車、無人機、高精地圖等精密導航應用上。
2. 半動態補正：改正範圍涵蓋全日本，網格檔每年更新一次，主要用於修正JGD控制點坐標的非均勻性地殼變動影響，GSI亦提供線上計算服務，SemiDynaEXE (<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/semidyna/web/index.html>)。此服務能提供在JGD基準內，不同觀測時刻之間的坐標轉換，目前在日本主要使用於測量用途。



定常時地殼變動補正示意圖

圖4 日本JGD2024定常時地殼變動補正策略示意圖，翻譯自

https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/chikakuhendo_background.html

GSI並且在大規模地震及火山活動後提供「非穩定狀態補正」機制，以修正地震和火山活動所導致之地殼變動影響。非穩定狀態補正網格檔的涵蓋範圍較小，僅限於受到地震和火山影響之地區，但網格點之密度較高。

三、臺灣大地基準雙框架策略之構想

類似於日本，我國為了反映臺灣地區的地殼變動狀況，已陸續發展出三種不同的TWD97成果版本，分別為參考時刻訂於1997.0的TWD97、參考時刻訂於2010.0的TWD97[2010]、以及參考時刻訂於2020.0的TWD97[2020]。目前TWD97大地基準的實際運用情況如下：

- 在地殼變動均勻一致的地區，如外島與北北基地區，由於控制點之相對位置基本維持不變，TWD97(或後續之版本)持續運行良好。
- 對於土地複丈、建物測量等地政機關日常執行的地籍測量業務而言，由於測區範圍較小，在大多數情況下控制點之相對位置並未受到地殼變動影響，TWD97(或後續之版本)亦持續運行良好。
- 對於較大範圍測繪業務(如基本及加密控制測量)、變形監測、高精度導航、科學研究任務而言，或是在大規模地震發生較為頻繁的花東地區，由於控制點之相對位置受地殼變動影響持續改變，導致控制點相對精度持續下降，TWD97(及後續之版本)逐漸遭遇困難。

過去30年來，TWD97控制點坐標是以10年左右之間隔重新設定並公告新的TWD97成果版本，以反映基本控制點持續位移的真實狀況。然而，頻繁的重設控制點坐標容易導致實用上的困難，特別是對於土地複丈、建物測量等需要長期穩定性的地籍測量業務而言。

另一方面，對於較大範圍的測繪業務，例如中央或縣市政府執行的基本及加密控制測量、政府單位或民間公司執行的地表變形監測、研究機構執行的科學研究任務等，由於測區範圍較大，控制點之相對位置受地殼變動影響而改變，使得控制點相對精度持續下降，因此在執行業務時需要考慮控制點坐標隨時間變化(即時變)之特點，以獲得合乎精度規範要求的成果。

根據上述說明，本研究參考澳洲雙框架策略，提出適合臺灣地區的雙框架構想。在此構想下，TWD97維持靜態並繼續作為法定大地基準，此外藉由區域性加密(regional densification)最新國際地球參考框架建立臺灣時變參考框架TTRF，如圖5所示。而目前最新的國際地球參考框架為ITRF2020 (Altamimi et al., 2023)。

TTRF之建立係藉由臺灣地區衛星追蹤站CORS (Continuously Operating Reference Station)觀測網之區域性加密ITRF2020來達成(圖5)。由於TWD97維持為法定大地基準，因此需要建立TTRF與TWD97的坐標轉換關係，以將TTRF時變坐標轉換為TWD97坐標。根據圖5，TTRF與TWD97[2020]之間的坐標轉換將藉由發展一個隨時間變化的地殼變位模型來實現。至於TWD97[2020]與TWD97[2010]、TWD97之間的坐標轉換，目前已可使用國土測繪中心提供的「坐標系統轉換計算程式」來完成(國土測繪中心全球資訊網-中文網-坐標系統轉換計算程式供應)。

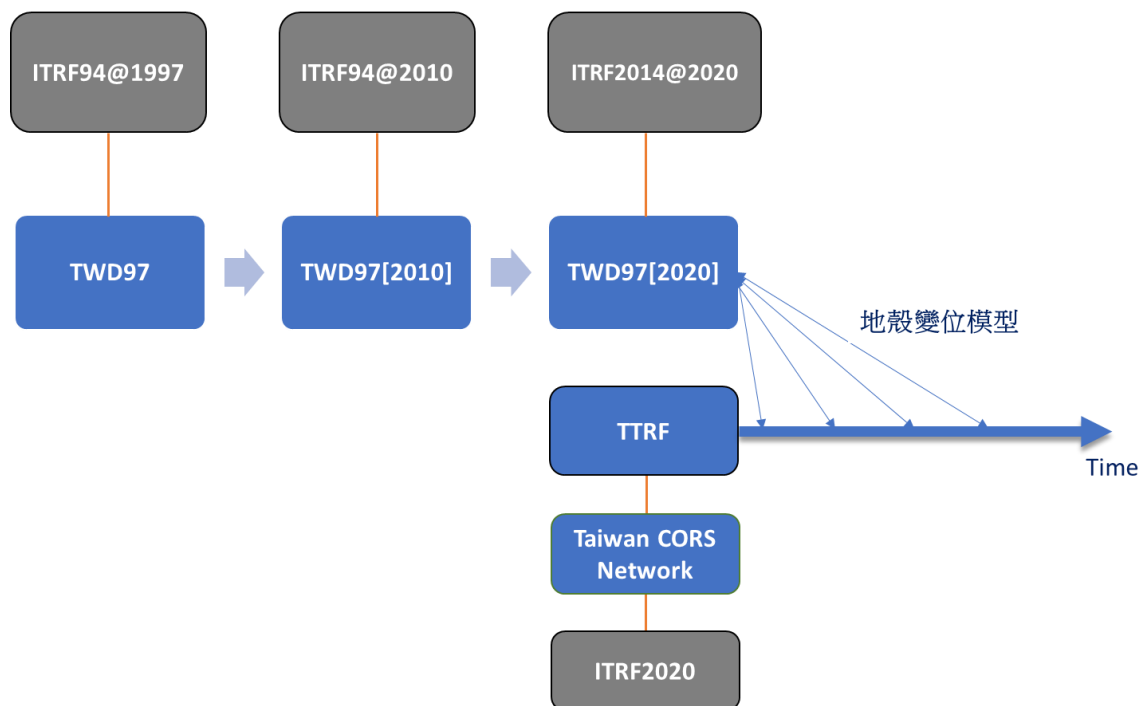


圖5 TWD97大地基準與TTRF時變框架共同組成的臺灣大地基準雙框架策略

四、臺灣時變參考框架之實現方法

為實現區域性加密ITRF2020，本研究使用之CORS觀測網每日解時間序列(daily solution time series)是由內政部國土測繪中心所產製。國土測繪中心係採用Bernese 5.2軟體以相對定位法解算臺灣地區400多個CORS站自2020/1/1至2024/12/31之GNSS觀測數據，由於相對定位使用的最小約制量是金門站(KMNM，IGS站)之ITRF2014@2010.0坐標，解算成果係定義在ITRF2014@2010.0框架下，因此必須將解算成果轉換至ITRF2020框架。

依照國際標準，ITRF2014至ITRF2020之轉換係藉由14參數相似轉換來完成(Petit and Luzum, 2010)，並由ITRF直接提供了14參數的公告值(表1)。

表1 ITRF2014至ITRF2020的相似轉換參數值(ITRF, 2025)

ITRF2014 to ITRF2020	$T_x \dot{T}_x$ (mm) (mm/yr)	$T_y \dot{T}_y$ (mm) (mm/yr)	$T_z \dot{T}_z$ (mm) (mm/yr)	$R_x \dot{R}_x$ (mas) (mas/yr)	$R_y \dot{R}_y$ (mas) (mas/yr)	$R_z \dot{R}_z$ (mas) (mas/yr)	$D \dot{D}$ (ppb) (ppb/yr)	Ref. Epoch
	1.4	0.9	-1.4	0.00	0.00	0.00	0.42	2015.0
	0.0	0.1	-0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	

在經過14參數轉換後，即可將國土測繪中心解算成果轉換為定義在ITRF2020@2010.0框架下。但由於相對定位的最小約制量依然是金門站之ITRF2020@2010.0坐標，因此仍需考量金門站之ITRF2020位移速度公告值(表2)，方可得到各CORS站定義在ITRF2020框架下的時間序列。本研究使用之轉換流程如圖6所示。

表2 金門站(KMNM)之ITRF2020位移速度公告值(ITRF, 2025)

Station	v_x (m/yr)	v_y (m/yr)	v_z (m/yr)
KMNM	-0.03101	-0.01046	-0.01065

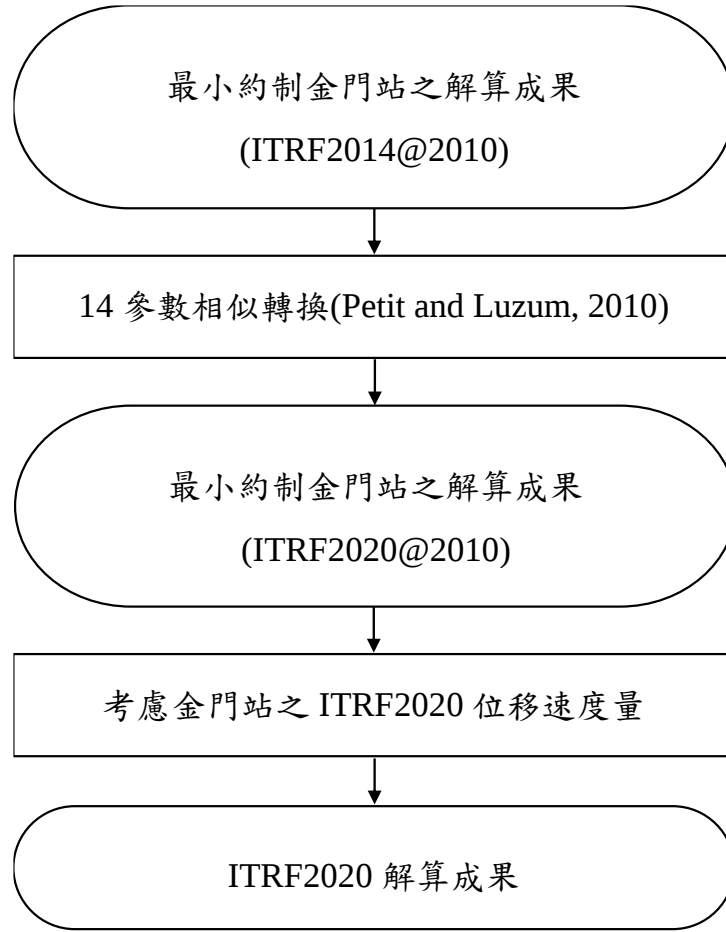


圖6 國土測繪中心CORS觀測網解算成果轉換至ITRF2020框架流程圖

得到各CORS站定義在ITRF2020(即TTRF)之時間序列後，本研究使用Nikolaidis (2002)經驗公式估算各站之坐標函數(coordinate function)：

$$\begin{aligned}
 y(t_i) = & a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) \\
 & + \sum_{j=1}^{n_g} g_j \cdot H(t_i - T_j) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j \cdot H(t_i - T_j) \cdot t_i \\
 & + \sum_{j=1}^{n_k} k_j \cdot H(t_i - T_j) \cdot \exp^{-(t_i - T_j)/\tau_j} + v_j
 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 y 為時變坐標， a 為ITRF2020@2020.0時刻的起始坐標， b 為震間時期的地殼運動速度， c 、 d 為年週期變化之振幅， e 、 f 為半年週期變化之振幅。 g 表示時間序列中的不連續跳動事件，通常為地震造成的同震位移； h 為震後線性速度改變量， k 為震後變形呈指數衰減的現象。 τ 稱作鬆弛時間(relaxation time)，代表震後變形衰減至總變形量的 $1/e$ 所需時間。 t 為觀測時間， T 為地震事件發生時間， i 、 j 分別代表測站以及地震事件的索引值。 H 為階梯函數，當地震事件影響產生位移時 $H=1$ ，反之 $H=0$ 。 v 代表殘差項。本研究是在確認發生規模大於6.0之地震事件且CORS站位移量大於15 mm時，才判定該站受到地震事件的影響，進而估計同震位移(即令 $H=1$)。

由於本研究使用之資料時間長度僅為5年(2020-2024年)，為了減少坐標函數參數之數量，本研究採用簡化的坐標函數，僅考慮起始坐標、震間速度以及同震位移量，亦即僅估算公式(1)中的 a 、 b 、 g 、 h 參數。簡化的坐標函數如下：

$$y(t_i) = a + bt_i + \sum_{j=1}^{n_g} g_j \cdot H(t_i - T_j) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j \cdot H(t_i - T_j) \cdot t_i + v_j \quad (2)$$

為了連接TTRF與TWD97[2020]，本研究同時定義起始坐標偏差量為CORS站之ITRF2020@2020.0時刻起始坐標與其已知TWD97[2020]公告坐標的差值：

$$\Delta a = a - a_{TWD97[2020]} \quad (3)$$

其中 a 為ITRF2020@2020.0時刻起始坐標， $a_{TWD97[2020]}$ 為TWD97[2020]公告坐標。由於TWD97[2020]係對齊ITRF2014@2020.0，因此起始坐標偏差量 Δa 包含了ITRF框架轉換修正量，即CORS站之ITRF2020@2020.0坐標與ITRF2014@2020.0坐標之間的偏差量。

由於2020至2024年期間共發生兩次規模大於6.0的地震，分別為2022年9月17-18日的花東地震以及2024年4月3日的花蓮地震，因此本研究共計估算1個起始坐標偏差場網格(集合各CORS站之起始坐標偏差量)、3個時期的震間速度場網格(集合各CORS站之震間速度量) (Li et al., 2019)、以及2個地震的同震位移場網格(集合各CORS站之同震位移量)。

圖7顯示了任意CORS站在觀測時間 t 的TTRF坐標(TTRF@ t)與TWD97[2020]坐標之間的變位量。變化量之估算係由該站的起始坐標偏差量、不同時期之震間位移量及同震位移量加總而得。集合各CORS站的變位量可產生變位場網格，即變位模型，可用於執行觀測時間 t 及鄰近日期(如3個月內)TTRF坐標與TWD97[2020]坐標的雙向轉換。

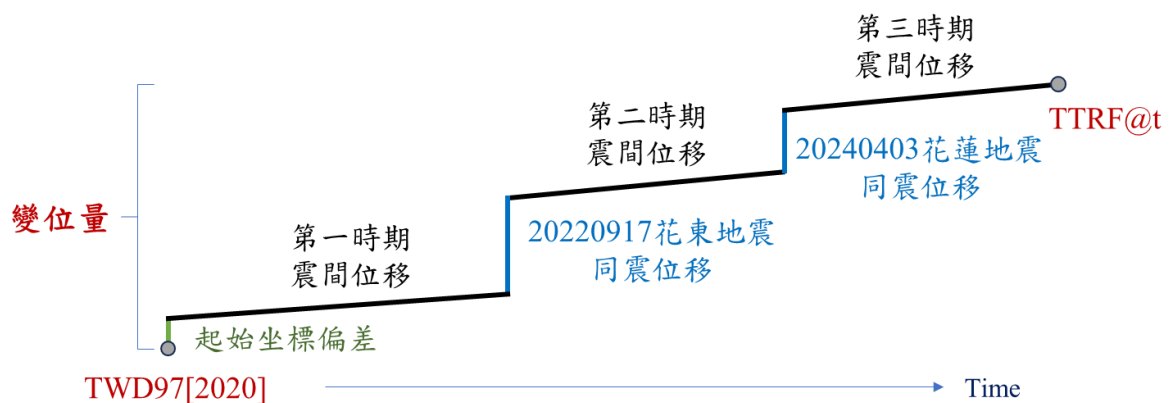


圖7 CORS站在觀測時間 t 的TTRF坐標與TWD97[2020]坐標之間的變位量

五、初步成果之驗證

本研究使用113年LiDAR技術更新數值地形模型案之加密控制測量觀測資料(2024年2月1日，24小時觀測)，分別在TWD97[2020]基準及TTRF框架內執行已知控

制點檢測業務。測區內已知控制點包含29個一等衛星控制點(圖8)，均具有已知的TWD97[2020]公告坐標。

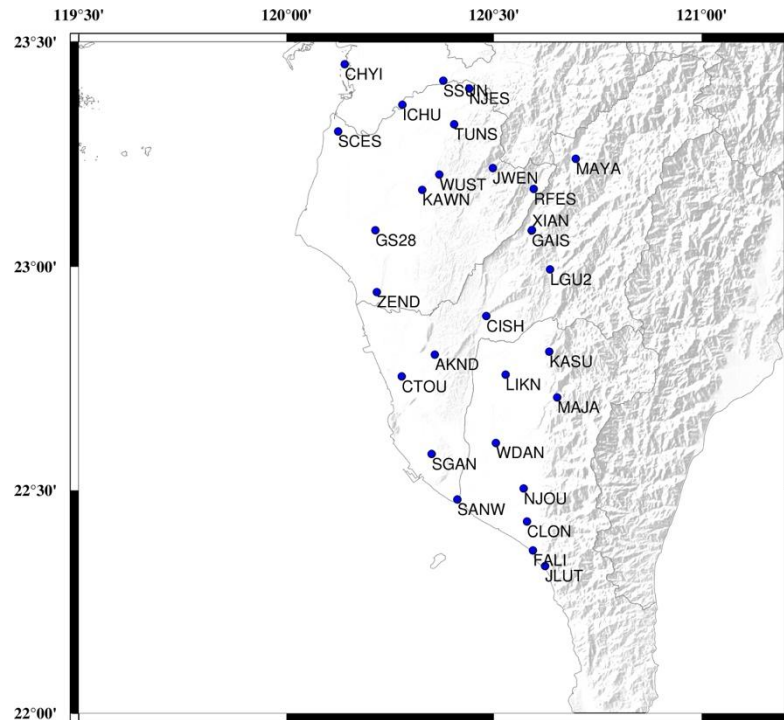


圖8 具有TWD97[2020]公告坐標之29個一等衛星控制點分布圖

選取測區北側之CHYI作為自由網平差之最小約制點，利用Trimble TBC軟體完成全組合基線解算。接著執行自由網平差，此時分別約制CHYI之TWD97[2020]公告坐標與其經由變位模型轉換所得之TTRF坐標(在觀測時刻)，平差計算其餘28個檢測點之TWD97[2020]坐標與TTRF坐標。

首先在TWD97[2020]基準內，比較最小約制CHYI所得之28個檢測點坐標與它們已知的TWD97[2020]公告坐標，並將差值展示於圖9及表3。圖9顯示距離最小約制點CHYI越遠之檢測點的差值越大，這主要反映了自2020年1月1日(TWD97[2020]參考時刻)至2024年2月1日(觀測時刻)期間，測區範圍內相對於最小約制點CHYI的地殼變動影響。

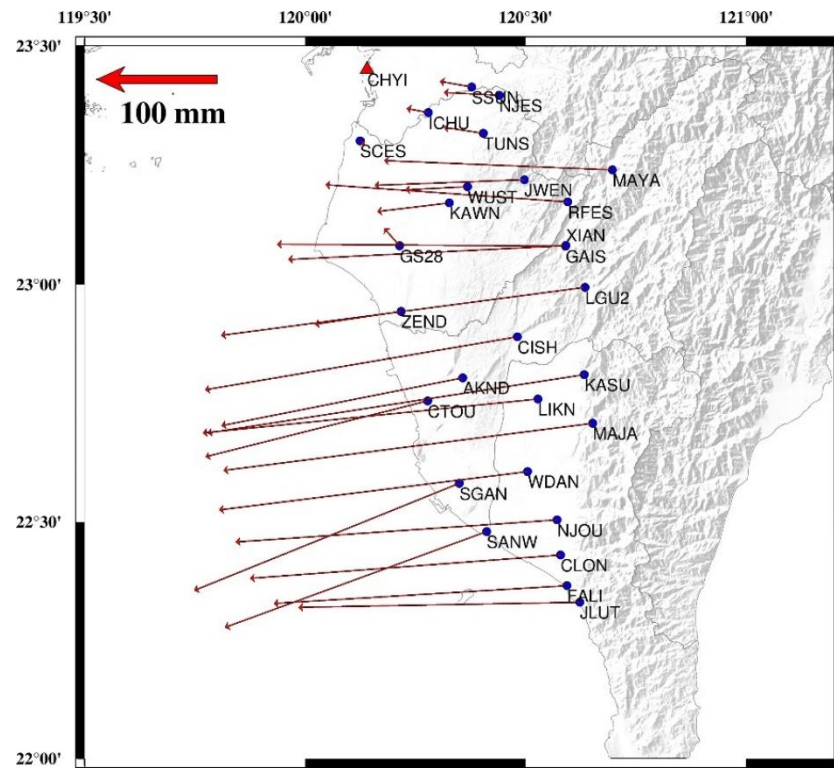


圖9 在TWD97[2020]基準內，檢測點最小約制平差成果與公告坐標之差值

表3 在TWD97[2020]基準內，最小約制CHYI所得之檢測點坐標與公告坐標之差值。
規範值是指CHYI與檢測點之間形成的重複基線分量差異上限值(參考表5)。

檢測點	坐標差值(mm)			基線重複性規範值(mm)		
	N	E	U	N	E	U
AKND	-40	-201	49	85	85	100
CISH	-44	-260	49	81	81	96
CLON	-20	-258	-33	129	129	147
CTOU	-47	-185	50	96	96	103
FALI	-15	-244	23	139	139	154
GAIS	2	-240	104	72	72	87
GS28	15	-13	-20	52	52	67
ICHU	3	-18	6	27	27	42
JLUT	-4	-234	41	144	144	159
JWEN	-5	-124	109	64	64	70
KASU	-49	-313	48	97	97	112
KAWN	-7	-60	35	65	65	69
LGU2	-40	-303	69	82	82	97
LIKN	-28	-279	51	96	96	111
MAJA	-39	-307	40	108	108	123
MAYA	8	-190	116	72	72	87
NJES	2	-46	46	41	41	56
NJOU	-18	-267	9	127	127	139
RFES	14	-201	87	66	66	81
SANW	-80	-218	36	121	121	136
SCES	-3	4	-7	27	27	42
SGAN	-89	-220	17	124	124	126
SSUN	5	-26	49	35	35	50
TUNS	5	-33	52	41	41	56
WDAN	-32	-256	23	111	111	126
WUST	-3	-52	70	53	53	72
XIAN	-12	-231	102	76	76	87
ZEND	-11	-72	58	74	74	82

接著在TTRF框架內，比較最小約制CHYI所得之28個檢測點坐標與它們經由變

位模型轉換所得的TTRF坐標，並將差值展示於圖10及表4。表4之坐標差值明顯小於表3之數值，代表變位模型確可有效修正測區範圍內之地殼變動影響。

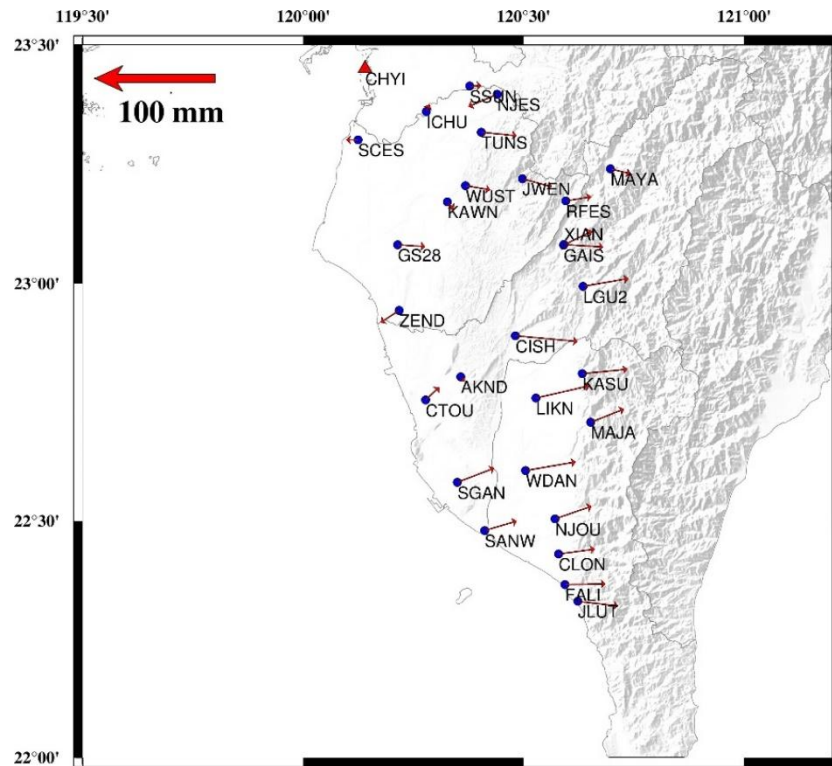


圖10 在TTRF框架內，檢測點最小約制平差成果與經由變位模型轉換所得坐標之差值

表4 在TTRF框架內，最小約制CHYI所得之檢測點坐標與經由變位模型轉換所得坐標
 之差值。規範值是指CHYI與檢測點之間形成的重複基線分量差異上限值(參考表5)。

檢測點	坐標差值(mm)			基線重複性規範值(mm)		
	N	E	U	N	E	U
AKND	-4	3	-26	85	85	100
CISH	-5	52	-18	81	81	96
CLON	4	30	-24	129	129	147
CTOU	11	11	-8	96	96	103
FALI	1	34	-19	139	139	154
GAIS	12	24	-8	72	72	87
GS28	-2	23	-32	52	52	67
ICHU	6	3	-15	27	27	42
JLUT	-4	33	-15	144	144	159
JWEN	-7	25	-3	64	64	70
KASU	4	37	-36	97	97	112
KAWN	-6	5	-36	65	65	69
LGU2	7	38	-22	82	82	97
LIKN	10	45	-28	96	96	111
MAJA	11	28	-38	108	108	123
MAYA	-4	17	2	72	72	87
NJES	-10	-24	-14	41	41	56
NJOU	11	30	-31	127	127	139
RFES	3	21	-17	66	66	81
SANW	8	27	-14	121	121	136
SCES	0	-10	-7	27	27	42
SGAN	12	31	-38	124	124	126
SSUN	0	10	-12	35	35	50
TUNS	-3	29	-19	41	41	56
WDAN	7	42	-31	111	111	126
WUST	-4	21	-19	53	53	72
XIAN	-2	33	-10	76	76	87
ZEND	-10	-15	-14	74	74	82

表5為基本控制測量實施規則中以衛星定位測量方法實施一等基本控制測量精

度規範。根據此精度規範，若採用TWD97[2020]基準進行一等控制點已知點檢測，有71.4%的已知控制點因無法通過基線重複性檢驗須被剔除(參考表3)；即便是使用規範值之兩倍作為檢測標準，仍有46.4%的已知控制點須被剔除。此處的基線是指最小約制點CHYI與各檢測點之間形成的基線。在另一方面，若採用TTRF框架進行一等控制點檢測，因為已知點坐標在經過變位模型轉換後已有效修正測區範圍內地殼變動之影響，即便是使用規範值本身作為檢測標準，全數點位均可順利通過檢測(參考表4)。

由以上成果分析可知，對於較大範圍之測繪業務，例如基本控制測量或加密控制測量，若直接在TWD97[2020]基準內作業，因為未考慮地殼變動因素，將導致平差成果精度下降。另一方面，若採用雙框架策略，則可利用變位模型先將已知點TWD97[2020]公告坐標轉換為觀測時刻之TTRF坐標，接著於TTRF框架內完成平差計算並解得待測點之TTRF坐標後，再利用變位模型將待測點坐標反向轉換為TWD97[2020]坐標，維護平差成果精度。

表5 以衛星定位測量方法實施一等基本控制測量之精度規範(節錄)

項目		精密星曆	備註
基線重複性	重複觀測基線水平分量之差值(單位：毫米)	$\leq (10 + 2 \times 10^{-6} \times L)$	L 為單一基線長度
	重複觀測基線垂直分量之差值(單位：毫米)	$\leq (25 + 5 \times 10^{-6} \times L)$	

六、結 論

地球的動態變化乃是明確的科學事實，包含板塊運動、地震及火山活動等自然現象。對於一個現代國家來說，國家大地基準必須妥善因應此現象，國際間最新發展趨勢為採用時變參考框架來反映地殼變動的真實情況，也就是將控制點坐標視為時間的函數，坐標值隨時間而變化，不再是固定的常數。

臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界，地殼變動型態複雜，導致控制點的位移情況顯著且持續。現有之TWD97屬於靜態基準，控制點坐標固定不變，雖然足以因應較小範圍之測繪業務需求，例如建物測量與土地複丈，但對於較大範圍之測繪業務，隨著時間的拉長將逐漸不符合精度需求，例如基本與加密控制測量、變形監測、科學研究等任務。

本研究參考國際發展趨勢提出一個臺灣大地基準雙框架策略構想。在此構想下，TWD97維持為靜態基準並延續法定地位，再運用臺灣地區超過400個CORS衛星追蹤站的觀測數據，以區域性加密國際地球參考框架方式建立臺灣時變參考框架TTRF。TTRF與TWD97[2020]之間則藉由發展一個地殼變位模型來實現雙框架坐標

的相互轉換。

根據2020至2024年臺灣地區的CORS觀測網數據，以及2024年國土測繪中心LiDAR技術更新數值地形模型案之加密控制測量觀測資料，本研究獲得的初步成果顯示雙框架策略確實可有效因應地殼變動之影響，維護大範圍測繪業務的成果品質。

此外，由於TTRF是ITRF2020框架在臺灣地區的區域性加密，因此對於傳統的ITRF使用者來說，例如高精度導航、變形監測與科學研究任務，TTRF亦可提供在臺灣地區的良好服務。

本研究成果目前僅使用5年的CORS觀測網數據，因此後續將增加觀測數據時間長度並持續分析。

致 謝

本文為內政部國土測繪中心「114年度臺灣時變參考框架建立採購案」研究成果之一部份，特此致謝。兩位匿名審查委員的修改建議對於本文有很大幫助，一併致謝。

參考文獻

- Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Collilieux, X., Chanard, K., and Barnéoud, J. 2023. ITRF2020 plate motion model, *Geophysical Research Letters*, 50(24).
- ICSM, 2020, ATRF technical implementation plan v2.3. Available at https://www.icsm.gov.au/sites/default/files/2020-02/ATRF%20Technical%20Implementation%20Plan%20v2.3_1.pdf.
- ICSM, 2024, GDA2020 technical manual v1.8. Available at https://www.icsm.gov.au/sites/default/files/GDA2020%20Technical%20Manual%20V1.8_published_0.pdf.
- ITRF, 2025, Transformation parameters between ITRF Solutions. Available at https://itrf.ign.fr/en/solutions/transformations?form%5BfromItrf%5D=ITRF2020&form%5BtoItrf%5D=ITRF2014&form%5Bsubmit%5D=&form%5B_token%5D=ab5b125a063b9d.DdmbGiQ8P3-UGqczg1SXB6o0gpr6tkcmiiAjHkCQtI.OK6qdUxjXEunUOUKtADCMutw7O_NhnJN4UJNdyzkm6hk6sNwXWVrK9tC1A.
- Li, C.K., Ching, K.E., and Chen, K.H. ,2019, The ongoing modernization of the Taiwan semi-dynamic datum based on the surface horizontal deformation model using GNSS data from 2000 to 2016. *Journal of Geodesy*, 93(9), pp.1543-1558.
- NGS ,2021, *Blueprint for the modernized NSRS, part 3: working in the modernized NSRS*, NOAA technical report NOS NGS 67. Available at https://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/NOAA_TR_NOS_NGS_0067.pdf.
- Nikolaidis, R. ,2002, *Observation of geodetic and seismic deformation with the Global*

Positioning System. Ph.D. Thesis, University of California, San Diego.

Petit, G. and Luzum, B. ,2010, IERS Conventions (2010), Available at <https://iers-conventions.obspm.fr/content/tn36.pdf>.

Yamashita, T., Tanaka, M., Marvit, K. ,2021, Towards an operational secular deformation modelling to more accurately maintain the Japanese semi-dynamic datum, *AGU Fall Meeting 2021*, New Orleans, LA, 13-17 December 2021, id. G55C-0270.

臺灣大地起伏模型之發展與 2025 年現況

黃金維¹

論文收件日期：115.05.21

論文修改日期：115.06.09

論文接受日期：115.06.15

摘 要

大地起伏模型是高程現代化、工程測量、地形製圖、災害評估及海陸空間資料整合的重要基礎。本文回顧臺灣大地起伏模型之發展脈絡，說明重力法與混合法大地起伏模型之差異，並整理截至 2025 年臺灣大地起伏模型之建置現況與實務應用。重力法大地起伏模型以 Stokes 積分法為主要理論基礎，可由重力異常推求具有物理意義的大地水準面起伏；然而，其實務精度仍受到重力資料品質、全球重力場模型、地形改正、長短波長訊號分離、資料格網化及誤差控制等因素影響。對臺灣而言，劇烈地形、山區重力資料不足、近岸與海陸交界資料銜接、離島垂直基準、不同觀測時間、坐標框架及地表變形等因素，使大地起伏模型建構更具挑戰。本文建立 2025 年臺灣重力法與混合法大地起伏模型，並利用 GNSS/水準觀測大地起伏資料進行評估。結果顯示，重力法模型可呈現臺灣本島、離島及周邊海域連續且具物理意義的大地起伏場，但相對於 GNSS/水準觀測資料仍存在約 -0.22 m 的平均差，反映其與 TWVD2001 現行高程基準之間的系統性差異。混合法模型透過 GNSS/水準觀測資料建立修正面，可有效降低此差異；獨立驗證中平均差降至 0.003 m，均方根為 0.041 m；整體 GNSS/水準資料評估中平均差為 0.001 m，均方根為 0.024 m。由於正高可由 $H=h-N$ (橢球高減大地起伏)求得，若使用偏小的大地起伏值，將可能使 GNSS、LiDAR、UAV 或衛星測量所得橢球高轉換之正高偏高，進而影響低平海岸地區之淹水與海平面上升風險評估。因此，本文建議重力法模型應作為具有物理意義之基礎模型，而混合法模型較適合作為臺灣現行高程基準下橢球高轉換為正高之實務模型。

關鍵詞：高程基準、混合法大地起伏模型、臺灣、橢球高正高化、重力法大地起伏模型

¹ 教授，國立陽明交通大學土木工程系，E-mail：cheinway@nycu.edu.tw

Development and 2025 Status of Taiwan Geoid Models

Cheinway Hwang¹

Abstract

Geoid models are fundamental to height modernization, engineering surveying, topographic mapping, hazard assessment, and the integration of land–sea spatial data. This paper reviews the development of Taiwan geoid models, explains the distinction between gravimetric and hybrid geoid models, and summarizes their status and practical applications as of 2025. A gravimetric geoid model is mainly based on Stokes’ integral, which transforms gravity anomalies into geoid undulations with a clear physical meaning. In practice, however, its accuracy depends not only on the theoretical formula but also on gravity data quality, global gravity field models, terrain corrections, wavelength separation, gridding, and error control. In Taiwan, steep topography, sparse gravity data in mountainous areas, nearshore and land–sea data connection, offshore island datums, different observation times, coordinate frames, and surface deformation complicate geoid modeling. This study establishes 2025 gravimetric and hybrid geoid models for Taiwan and evaluates them using GNSS/leveling-derived geoid undulations. The results show that the gravimetric model provides a continuous and physically meaningful geoid surface over Taiwan, its offshore islands, and surrounding seas. However, it shows an average difference of about -0.22 m relative to GNSS/leveling observations, reflecting a systematic difference from the current TWVD2001 height datum. The hybrid model reduces this difference by fitting a correction surface using GNSS/leveling observations. In the independent validation, the mean difference is reduced to 0.003 m and the root mean square difference (RMSD) to 0.041 m. For the full GNSS/leveling dataset, the mean difference is 0.001 m and the RMSD is 0.024 m. Because orthometric height is obtained from $H=h-N$ (ellipsoidal height minus geoid undulation), using an underestimated geoid undulation may lead to overestimated orthometric heights derived from GNSS, LiDAR, UAV, or satellite-based ellipsoidal heights. This could affect flood and sea-level-rise assessments in low-lying coastal areas. The gravimetric model is best regarded as a physically meaningful reference model, whereas the hybrid model is more suitable for operational ellipsoidal-to-orthometric height conversion under Taiwan’s current height datum.

Keywords: Ellipsoidal-to-orthometric Height Conversion, Gravimetric Geoid, Hybrid Geoid, Taiwan, Vertical Datum

¹ Professor, Department of Civil Engineering, National Yang-Ming National Chiao Tung University,
E-mail: cheinway@nycu.edu.tw

一、前言

高程基準與大地起伏模型是國家測繪與空間資訊建設的重要基礎，對橢球高轉換為正高、工程測量、地形製圖、災害監測、國土規劃，以及海陸空間資料整合皆具有直接影響。傳統高程系統通常以潮位站長期平均海水位作為高程零點，並透過水準測量向全國傳遞正高成果。然而，隨著全球衛星導航系統（Global Navigation Satellite System, GNSS）、光達測量（Light Detection and Ranging, LiDAR）、無人飛行載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）測量及衛星測量技術日趨成熟，各類測量成果常以橢球高表示，因而提高了將橢球高轉換為正高的實務需求。若僅依賴傳統水準測量維持高程系統，將面臨長距離誤差累積、維護成本高、更新效率有限，以及地表變形影響等問題。因此，結合橢球高與大地起伏模型推求正高，已成為現代高程基準發展的重要方向。

依建置方式而言，大地起伏模型大致可分為重力法大地起伏模型與混合法大地起伏模型。重力法大地起伏模型主要由地球重力場資料、全球重力場模型與地形資料計算而得，可反映重力等位面與區域質量分布，具有明確的物理意義。混合法大地起伏模型則以重力法大地起伏模型為基礎，再加入由 GNSS 橢球高與水準正高推得的觀測大地起伏資料，建立重力法模型與現行高程基準之間的修正關係，使模型成果更符合工程測量與橢球高轉換為正高之需求。換言之，重力法大地起伏模型重視物理一致性，混合法大地起伏模型則進一步強調與既有高程系統及實務應用之相容性。

重力法大地起伏模型具有完整的物理大地測量基礎，其中 Stokes 積分法 (Hofmann-Wellenhof and Moritz 2006) 是由地表重力異常推求大地起伏的重要理論。然而，區域重力法大地起伏模型的精度並非僅由理論公式決定，也受到重力資料品質、全球重力場模型、地形資料、長短波長訊號分離方式，以及誤差控制策略等因素共同影響。因此，實際模型成果常反映資料條件、計算方法與區域環境的綜合效果。

臺灣地區的重力法大地起伏模型研究，可上溯至早期數值大地水準面模型之建立。當時受限於重力資料密度不足、全球重力場模型解析度有限、數值地形資料品質及計算能力等條件，山區與資料稀疏區域之模型成果仍存在較高不確定性（崔國強，1995）。其後，相關研究逐步導入衛星測高、空載重力、船載重力及多源重力資料，以補足陸域、山區、近岸與外海資料缺口。Hwang（1997）分析衛星測高海面梯度之系統誤差，指出衛星測高雖有助於補充海域重力資訊，但仍可能受到軌道誤差、潮汐模型誤差與海面地形等因素影響，近岸與淺水區域尤其需要審慎處理。空載重力則可改善山區地面重力資料不易布設的問題，但仍須面對 GNSS 飛行器定位、資料濾波、向下延拓與系統誤差控制等挑戰（Hwang et al., 2007）。

在高程系統與觀測大地起伏資料整合方面，楊名與陳俊廷（1999）較早結合水準、Global Positioning System (GPS) 與重力法大地起伏資料建立聯合平差模式，用以評估臺灣高程系統精度，並指出水準原點、觀測網形與資料配置會影響正高及大

地起伏之空間精度。陳國華（2004）進一步整合臺灣高程基準 2001（Taiwan Vertical Datum 2001, TWVD2001）水準成果與 GPS 資料，改進臺灣區域性大地水準面模式，並應用於 GPS 高程測量。這些研究顯示，觀測大地起伏資料是連接橢球高、現行正高系統與重力法大地起伏模型的重要橋梁，也是後續混合法大地起伏模型發展的基礎。

在模型精化與實務應用方面，You（2006）利用 GPS 與水準資料改善局部大地起伏模型，說明幾何高程資料可用於修正重力法模型與實際高程成果之差異。黃金維等（2013）則從防災、監測與高程現代化應用角度，說明新一代臺灣大地水準面模式之建置需求，並指出多源重力資料、地形資料與 GNSS/水準資料對模型精度具有關鍵作用。內政部於 2014 年公告臺灣地區大地起伏模型成果，代表我國大地起伏模型進入較完整的官方應用階段，並成為橢球高轉換為正高及工程應用的重要基礎。

近年研究持續從資料補強、模型精化、高程現代化與工程應用等面向，探討臺灣大地起伏模型之精度限制與改善方向。Hsiao et al.（2017）利用實測與模式化重力梯度資料改善臺灣大地起伏模型，顯示重力梯度資料可補充部分區域之短波長重力場資訊，有助於提升地形變化劇烈區域之模型表現。Hwang et al.（2020）建立臺灣重力法與混合法大地起伏模型，並應用於高程現代化、跨島基準連結及空載 LiDAR 製圖。該研究指出，單純重力法大地起伏模型與 GNSS/水準觀測值之間仍可能存在明顯差異，因此有必要透過混合法大地起伏模型改善其與現行高程系統之一致性。

此外，Hwang et al.（2021）從亞太區域重力場與大地起伏模型研究的角度指出，不同地區在重力資料取得、地形效應處理、高程基準建立、海陸資料整合與模型應用需求上，皆具有不同程度的挑戰。此一觀點說明，大地起伏模型建構並非單一資料或單一方法問題，而是需同時考量區域地形條件、重力資料品質、垂直基準系統與實務應用需求。對臺灣而言，山區、近岸、離島及地表變形等條件交互影響，使大地起伏模型之建構與精度評估更需要從整體資料整合與高程基準一致性的角度加以檢視。

隨著研究範圍與應用需求擴大，臺灣大地起伏模型相關研究已由本島陸域逐步延伸至近岸、海域與離島區域。此一發展趨勢顯示，臺灣大地起伏模型之建構困難已不再侷限於單一重力資料或單一計算方法，而是同時涉及山區重力資料不足、近岸衛星測高誤差、數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM）與數值海底地形模型（Digital Bathymetric Model, DBM）銜接、離島垂直基準整合、不同觀測時間與坐標框架轉換等複合性議題（Huang et al., 2021；劉文業，2023；楊致逸與蕭宇伸，2026）。Huang and Han（2023）提出區域大地起伏模型最佳化之適應性方法，也說明在工程應用情境下，大地起伏模型之精度與空間適用性仍需依據資料分布、區域特性及應用需求進行調整。

綜合上述研究可知，臺灣大地起伏模型之建構長期受到多項因素限制，包括山區地形劇烈造成短波長重力訊號不易掌握、陸測重力資料於高山地區分布不足、近岸衛星測高資料易受陸地與海況影響、陸域 DEM 與 DBM 銜接不易，以及離島垂

直基準與本島高程系統整合困難。這些問題使重力法大地起伏模型雖具有物理一致性與空間連續性，但其成果仍可能與現行高程系統存在系統性差異。基於此，混合法大地起伏模型成為改善重力法模型與現行高程系統差異的重要途徑。其核心並非取代重力法大地起伏模型，而是在重力法模型所提供的物理基礎上，加入 GNSS/水準觀測大地起伏資料，以建立修正面並提高模型與現行高程系統之一致性。對臺灣而言，混合法大地起伏模型可作為將 GNSS、LiDAR、UAV 或衛星測量所得橢球高轉換為 TWVD2001 正高的銜接工具，對工程測量、地形製圖、海岸低地高程判釋與既有高程成果延續具有重要實務價值。然而，混合法大地起伏模型之品質仍高度依賴 GNSS/水準共同點之精度、空間分布、不同觀測時間之處理及參考框架一致性，因此仍須透過獨立驗證與整體資料評估，確認其精度與可靠性。表 1 彙整臺灣大地起伏模型相關研究之主要內容。

表 1 臺灣大地起伏模型文獻彙整表

作者（年份）	研究內容
崔國強（1995）	進行臺灣地區數值大地水準面模型計算，建立早期區域大地起伏模型研究基礎。
Hwang（1997）	分析衛星測高海面梯度系統誤差，探討其對臺灣大地起伏模型計算之影響。
楊名與陳俊廷（1999）	聯合水準、GPS 與重力法大地起伏值資料，評估臺灣高程系統精度。
陳國華（2004）	整合 TWVD2001 水準成果與 GPS 資料，改進臺灣區域性大地水準面模式。
You（2006）	利用 GPS 與水準資料改善局部大地起伏模型，提升 GPS 高程測量精度。
Hwang et al.（2007）	探討臺灣空載重力測量資料化算、精度評估及其於大地起伏模型建置之應用。
黃金維等（2013）	說明新一代臺灣大地水準面模式建置，及其於防災、監測與高程現代化應用。
許宏銳（2014）	整合空載、衛星測高、陸測與船測重力資料，建構公分級臺灣大地起伏模式。
Hsiao et al.（2017）	利用實測與模式化重力梯度資料，改善臺灣大地起伏模型之建置精度。
Hwang et al.（2020）	建立臺灣重力法與混合法大地起伏模型，應用於高程現代化與 LiDAR 製圖。
Huang et al.（2021）	探討臺灣本島、離島與臺灣海峽之大地起伏模型及無縫垂直基準應用。
Hwang et al.（2021）	綜述亞太區域重力場與大地起伏模型研究，說明區域建模與應用議題。

劉文業（2023）	評估 2023 觀測大地起伏資料，探討其對臺灣大地水準面模型改進效果。
Huang and Han（2023）	提出區域大地起伏模型最佳化之適應性方法，強化工程應用精度。
楊致逸與蕭宇伸（2026）	分析 DEM、DBM 解析度與海岸線定位，對臺灣東部陸海交界大地起伏模型精度影響。

二、大地起伏模型之基本理論與橢球高正高化

(一) Stokes 積分法

Stokes 積分法是建立重力法大地起伏模型最具代表性的理論方法之一。其基本概念是利用地表重力異常，透過積分推求大地水準面相對於參考橢球面的起伏。Stokes 公式的基本形式可表示為：

$$N_p = \frac{R}{4\pi\gamma_p} \iint_{\sigma} \Delta g_q S(\psi_{pq}) d\sigma_q \quad (1)$$

式中， N_p 為點 p 大地起伏， R 為地球平均半徑， γ_p 為正常重力， Δg_q 為重力異常， $S(\psi_{pq})$ 為 Stokes 函數， ψ_{pq} 為計算點 p 與積分點 q 之球面距離， $d\sigma_q$ 為球面面積元素， σ 表示積分範圍，在理論上為整個地球表面。由式（1）可知，某一位置的大地起伏並非僅由該點的重力異常決定，而是受到周圍甚至全球重力異常場共同影響。因此，Stokes 積分法可視為一種將空間重力場資訊轉換為大地水準面起伏的積分工具 (Hofmann-Wellenhof and Moritz, 2006)。

然而，式（1）雖然形式簡潔，實際應用卻並不簡單。Stokes 公式是重力場邊值問題的一種數學解，其成立需滿足若干理論假設，例如大地水準面外部無質量，且所使用的重力異常需符合相應的邊界條件。實務上，重力異常可以依不同理論與資料處理方式定義在大地水準面上，或依 Molodensky 理論處理為地表邊界值。不同重力異常定義、地形質量處理方式及邊值問題假設，會導致不同形式的 Stokes 積分應用方法。此外， N_p 表示點 p 大地水準面相對於某一參考橢球面的垂直距離，其幾何意義可視為大地水準面相對於橢球面的高度差，形式上類似橢球高，但其對象為大地水準面，而非 GNSS 觀測所得之地表點橢球高 h 。然而式（1）並未定義該參考橢球及其坐標框架。換言之，Stokes 公式可視為重力法大地起伏模型的理論核心，但要形成可供實務使用的數值模型，仍須配合資料約定、重力改正、地形處理、參考框架及高程基準定義。

(二) 去除－計算－回復法

在實際重力法大地起伏模型計算中，Stokes 積分法通常不會直接作用於原始重力資料，而是會與去除－計算－回復法 (Remove-Compute-Restore, RCR) 配合使用。

RCR 的主要目的，是將重力場依空間尺度分解為不同波長成分，分別處理後再重新組合，以降低區域資料不足及長短波長混合所造成的誤差。

在去除階段，首先利用全球重力場模型扣除長波長重力訊號，使剩餘資料主要代表區域內的中、短波長重力變化。此步驟可減少有限區域資料無法完整描述全球尺度重力場的問題。接著，在計算階段，將殘餘重力異常代入 **Stokes** 積分，以求得殘餘大地起伏或高程異常。最後，在回復階段，再將先前移除的全球長波長訊號及必要的地形相關訊號加回，形成最終的重力法大地起伏模型。

地形改正則是 **RCR** 架構中不可忽略的環節。由於地表起伏代表質量分布，高山、丘陵、谷地與平原等地形變化都會對局部重力場造成影響。若未妥善處理地形質量效應，重力異常中可能保留與地形相關的系統性訊號，進而影響 **Stokes** 積分計算所得的大地起伏成果。地形資料主要用來描述地表質量對重力場的影響，並輔助恢復短波長重力訊號。因此，地形改正不只是資料處理程序，也是連結地表質量分布、重力異常與大地起伏的重要步驟。

(三) 由理論公式到實務模型的限制

Stokes 積分法雖然提供重力法大地起伏模型的理論基礎，但要將式(1)轉化為可供實務使用的高精度模型，仍須面對多項限制。首先，**Stokes** 公式理論上需對全球範圍內的重力異常進行積分，才能完整求得計算點的大地起伏；但實際區域模型通常只能使用有限範圍內的重力資料，因此必須截斷積分區域。此種區域化處理會產生截斷誤差，使計算結果無法完全反映全球重力場對大地水準面的影響。因此，積分半徑選取、全球重力場模型補償長波長訊號，以及 **Stokes** 核函數修正，都是實務計算中必須處理的重要問題。

其次，**Stokes** 積分法高度依賴重力異常資料品質。若重力資料存在粗差、系統偏差、空間分布不均或資料缺口，這些誤差都可能經由積分過程傳入大地起伏模型。因此，在進行 **Stokes** 積分前，通常需先完成粗差偵測、系統偏差修正、資料整合與格網化處理，以確保所使用的重力異常場具有足夠穩定性與代表性。

第三，長波長與短波長訊號之分離會直接影響模型成果。全球重力場模型主要描述長波長重力訊號，區域重力資料與地形資料則用於補充中、短波長成分。若長波長訊號移除不完整，或短波長訊號恢復不足，最終大地起伏模型便可能產生偏差。因此，**RCR**、地形改正及格網化方法的選擇，均會影響重力法大地起伏模型之精度與穩定性。

綜合而言，**Stokes** 積分法能建立重力異常與大地起伏之間的理論關係，但實務模型精度並非僅由公式本身決定。要建立可供橢球高轉換為正高、工程測量與國家高程基準使用的大地起伏模型，必須同時處理重力資料品質、全球重力場模型選擇、地形改正、長短波長分離、核函數修正、資料格網化與誤差控制等問題。因此，式(1)可視為重力法大地起伏模型的理論核心，而資料品質與處理策略則是決定模型能否達到實務精度需求的關鍵。

(四) 橢球高轉換為正高

數值大地起伏模型的重要用途之一，是提供大地起伏值，使橢球高可轉換為正高。其基本關係式為：

$$H = h - N \quad (2)$$

式中， H 為正高， h 為橢球高， N 為大地起伏。由式（2）可知，正高的精度同時取決於橢球高 h 與大地起伏 N 的精度。若 h 或 N 存在系統性誤差，轉換後的正高 H 也會受到影響。

在實務應用中，橢球高 h 可由 GNSS、攝影測量、UAV、LiDAR 或衛星測量等方式取得。無論資料來源為何，橢球高都必須明確對應至特定參考橢球、坐標框架及觀測時間。例如，在臺灣應確認橢球高是依據國際地球參考框架（International Terrestrial Reference Frame, ITRF）或國家坐標框架如 TWD97、TWD97[2010]、TWD97[2020]等成果取得。若不同資料使用不同坐標框架或不同觀測時間，橢球高之間可能存在系統性差異，進而影響正高轉換成果。

此外，橢球高的精度也取決於測量方法與控制點品質。以 GNSS 測量為例，衛星幾何、遮蔽環境、多路徑效應、天線高度測及資料處理方式都會影響橢球高精度。以 LiDAR、UAV 或衛星影像建置地形資料時，則需考量地面控制點、空中三角測量、感測器定位定姿、資料校正及坐標轉換等因素。若控制點本身的坐標框架或高程基準不一致，即使大地起伏模型精度良好，轉換後的正高成果仍可能產生偏差。

相較之下，大地起伏的精度則取決於大地起伏模型本身。重力法模型具有較明確的物理意義，但其成果可能與現行高程基準存在系統性差異；混合法模型則透過 GNSS/水準觀測大地起伏資料建立修正面，使模型更符合現行高程基準。本文後續第 3 節將說明臺灣建立重力法大地起伏模型時所面臨的區域性挑戰，第 4 節則進一步比較重力法與混合法大地起伏模型於橢球高轉換為正高時的精度與實務意義。

三、臺灣重力法大地起伏模型建構之區域性挑戰

臺灣重力法大地起伏模型之建構，除了需面對一般區域重力法模型所共有的資料品質、地形改正、長短波長分離與誤差控制問題外，還受到臺灣特殊地形、海陸分布、離島配置、地殼變形及現行高程基準等因素影響。這些區域性條件使臺灣大地起伏模型的建置，不只是重力資料計算問題，也涉及高程基準、資料觀測時間與實務應用之一致性。

（一）劇烈地形與山區重力資料不足

臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交會帶，地形起伏劇烈。中央山脈、雪山山脈與海岸山脈等高山地形，與西部平原、東部縱谷及周邊海域形成強烈對比。此種短距離內快速變化的地形，使重力場具有明顯的短波長特徵，也使地形改正與短波長重力訊號恢復成為模型精度控制的關鍵。

山區地面重力資料不足是臺灣模型建構的長期限限制。高山地區交通條件不佳，

重力測點難以均勻布設，部分區域資料密度仍不足。當重力點分布不均時，模型對山區短波長重力變化的描述能力會受到限制。空載重力可改善山區資料覆蓋，但因觀測高度較高，仍需透過濾波、向下延拓及與地面重力資料整合，才能有效反映近地表重力場。

因此，臺灣山區的主要挑戰並非只有地形高差大，而是劇烈地形與資料不足同時存在。前者使重力場變化複雜，後者使模型不易完整掌握這些變化。這也是山區長期成為臺灣重力法大地起伏模型精度較難控制區域的主要原因。

(二) 海陸交界、近岸與離島資料銜接

臺灣四周環海，且東部地區常呈現由高山快速過渡至深海的地形型態，使海陸交界成為大地起伏模型建構中最困難的區域之一。在此類區域中，陸域地形、海底地形、陸測重力、船載重力與衛星測高重力需要相互銜接；若任一資料來源存在不連續或基準不一致，均可能造成局部模型誤差。

在海陸交界處，陸域 DEM 與 DBM 之解析度、資料來源及基準常不完全一致。若海岸線位置不精確，或陸域與海域地形資料無法正確銜接，將影響地形遮罩、地形改正及殘餘地形訊號處理。這個問題在斷崖型海岸、河口、港灣及地形急變區域尤其明顯。

近岸衛星測高資料也存在限制。衛星測高在外海通常具有良好覆蓋能力，但接近海岸時，雷達回波容易受到陸地、潮汐改正、海況及海面地形變化影響，使近岸海面高與推估重力異常品質降低。若近岸船載重力資料不足，則衛星測高重力與陸域重力之間的銜接可能成為模型誤差來源。

離島地區則涉及另一類問題。金門、馬祖、澎湖、蘭嶼、綠島及小琉球等離島與臺灣本島在空間上分離，其重力資料、潮位資料、GNSS/水準資料及高程控制成果未必能與本島形成一致的垂直基準關係。若缺乏足夠的離島重力與 GNSS/水準觀測資料，模型可能依賴外插或較低解析度資料推估，進而影響離島大地起伏模型與當地高程基準之一致性。

因此，臺灣近岸、海陸交界與離島問題，並非單純增加某一類資料即可完全解決，而是同時牽涉海岸線定位、DEM/DBM 銜接、近岸測高品質、船載重力分布、潮位基準及本島—離島高程關係等因素。這使臺灣大地起伏模型不只是陸域重力場建模問題，更是海陸與離島垂直基準整合問題。

(三) 多源重力資料整合與區域誤差控制

由於臺灣同時包含高山、丘陵、平原、近岸、外海及離島等多樣環境，單一重力資料來源難以完整描述全區重力場。因此，臺灣重力法大地起伏模型通常需要整合陸測重力、空載重力、船載重力、衛星測高推估之海洋重力資料，以及全球重力場模型與地形資料。這些資料彼此互補，但其觀測方式、空間解析度、觀測高度、精度及誤差來源均不相同。

陸測重力可直接反映陸域地表及近地表質量分布，對平原、丘陵及部分山區十

分重要；空載重力可補足山區或資料稀疏區域，但需處理觀測高度、濾波與向下延拓問題；船載重力可補強近岸與海域資料，但可能受航線分布、船體運動、海況、航速及儀器漂移影響；衛星測高重力可提供外海大範圍重力場資訊，但在近岸區域品質通常較不穩定。

因此，多源資料整合的關鍵不只是增加資料量，而是建立一致的資料基準與誤差控制方式。若不同資料來源未經適當檢核與加權，可能在重力異常格網中形成區域偏移、不連續或局部異常。特別是在山區與平原交界、海陸交界及本島與離島之間，資料來源轉換快速，模型更容易受到資料銜接不良的影響。

從臺灣過去大地起伏模型發展經驗來看，主要困難已由早期的資料不足，逐漸轉向資料整合、品質控制與區域誤差管理。換言之，新的資料來源雖然能改善覆蓋率，但也必須配合系統性偏差改正、粗差偵測、權重設定與獨立驗證，才能真正提升模型可靠性。

(四) 重力法大地起伏模型與 TWVD2001 之差異

臺灣現行高程基準 TWVD2001 係由潮位資料與水準網成果建立，並已長期應用於工程測量、地籍測量、地形製圖及國家高程控制。相較之下，重力法大地起伏模型主要依據重力場推估，較接近物理等位面。由於兩者建立基礎不同，重力法大地起伏模型與 TWVD2001 之間出現差異，並不必然代表重力法模型錯誤，而可能反映物理基準面與現行法定高程系統之間的系統性差別。

此種差異對實務應用具有重要影響。若直接以重力法大地起伏模型將橢球高轉換為正高，所得正高可能與既有水準成果不一致，進而影響工程設計、施工測量、地籍成果及地形資料銜接。對測量使用者而言，模型成果能否與現行法定高程系統相容，往往比其是否完全符合物理等位面更直接影響應用可行性。

因此，重力法大地起伏模型與 TWVD2001 之間的差異，是發展混合法大地起伏模型的重要原因。混合法大地起伏模型透過 GNSS/水準觀測資料建立修正面，使重力法模型在保留物理連續性的同時，更符合現行高程基準與工程應用需求。由此可知，重力法模型與混合法模型並非相互取代，而是具有不同功能定位：重力法模型提供物理基礎，混合法模型提升模型與既有高程系統之相容性。

(五) 不同觀測時間、坐標框架與地表變形之影響

臺灣大地起伏模型之應用，除了受到重力與地形資料影響外，也受到 GNSS 與水準資料觀測時間、坐標框架及地表變形之影響。此問題在混合法大地起伏模型中特別重要，因為混合法模型需使用 GNSS 橢球高 h 與水準正高 H 形成觀測大地起伏 $N=h-H$ ，再作為修正重力法大地起伏模型與現行高程基準差異的依據。若 h 與 H 不是在相同或相近時間取得，且測點在兩次觀測期間發生垂直位移，則計算所得的 $N=h-H$ 將不再單純代表大地水準面與參考橢球面之間的幾何差，而會同時包含地表變形造成的誤差。

理想情況下，GNSS 橢球高與水準正高應對應至相同觀測時間、相同坐標框架

及相同高程基準。然而，實際資料常來自不同觀測年度與不同作業來源。例如，某一測點的 GNSS 觀測可能完成於某一年，而水準成果則來自較早或較晚的測量。若該測點在兩次觀測期間發生地層下陷、地震同震位移、震後變形或長期地殼垂直運動，則由 $h-H$ 所得到的觀測大地起伏將包含時間差造成的垂直位移誤差。這種誤差若未經修正，可能被誤認為是重力法大地起伏模型與現行高程基準之間的差異，並進一步進入混合法模型之修正面。

不同觀測時間也可能造成 GNSS 橢球高 h 的坐標框架不一致。GNSS 成果通常依據特定參考框架、坐標系統與觀測時期處理而得。若不同年度的 GNSS 成果使用不同參考框架，或未將坐標成果轉換至一致的框架與時間，橢球高 h 可能產生系統性差異。當此類橢球高再與水準正高 H 結合時，所得 $N=h-H$ 可能同時包含大地起伏訊號、地表變形訊號，以及坐標框架不一致造成的高程偏差。

臺灣位於板塊交會區，地震活動、地殼變形與地層下陷現象皆相當明顯。西南部沿海平原長期受地層下陷影響，花東地區則受板塊碰撞與地震活動控制，部分區域的垂直變動不可忽略。在這些地區，若 GNSS 與水準資料的觀測時間差未被妥善處理，觀測大地起伏可能帶有非大地起伏訊號，進而影響混合法大地起伏模型之可靠性。此問題在地層下陷區、地震影響區及長期垂直速度較大的區域尤其重要。

因此，在建立混合法大地起伏模型時，不能只檢查 GNSS/水準共同點的數量與空間分布，也必須確認 GNSS 橢球高、水準正高、坐標框架與觀測時間之間的一致性。若資料來自不同觀測時間，應儘可能利用垂直速度場、地震位移模型或其他變形資訊，將 GNSS 與水準成果修正至一致的時間基準；同時，也應將 GNSS 橢球高統一至一致的坐標框架。唯有如此，由 $N=h-H$ 所形成的觀測大地起伏才能較合理地作為混合法模型的約制資料，避免將地表變形或坐標框架差異誤納入大地起伏模型中。

四、大地起伏模型(2025)之建立與精度改善

(一) 新重力法大地起伏模型之建立

本研究以重力資料、全球重力場模型與地形資料為基礎，依循 Hwang et al. (2020) 所述方法，建立 2025 年重力法大地起伏模型。此方法亦曾用於內政部 2014 年公告之臺灣大地起伏模型。換言之，本研究在重力法大地起伏模型之理論架構與主要計算流程上，延續既有研究與公告模型所採用之方法，包括重力資料整合、全球重力場模型應用、地形改正、Stokes 積分法，以及去除—計算—回復法等處理程序。然而，2025 年模型並非單純重複 2014 年公告模型之成果，而是在相同方法架構下，進一步更新地形資料、海域重力資料及離島重力異常資料，使模型能反映較新的資料條件與應用需求。

地形資料採用內政部於 2024 年公告之 20 m 解析度 DEM。此資料具有較高空間解析能力，可較細緻呈現臺灣本島山區、丘陵、河谷與平原地區的高程變化，適合作為重力法大地起伏模型建置之地形基礎。相較於較低解析度 DEM，20 m 解

析度資料在地形變化快速區域，尤其是山區，可降低地形過度平滑造成的資訊損失，並更清楚表現山脊、谷地及坡面轉折等地形特徵。因此，採用 20 m 解析度 DEM 有助於提升地形改正對局部地形變化之描述能力，特別是在臺灣中央山脈、雪山山脈及其他地形起伏劇烈區域，可使短波長地形訊號在模型建置中獲得較完整表現。重力資料方面，本研究整合陸測重力、船載重力、空載重力、衛星測高推估之全球海洋重力異常模型，以及離島重力異常資料。其中，陸測、船載與空載重力資料來源與 2014 年臺灣大地起伏模型所使用之資料相同。這些資料已完成必要之前處理與品質控制，並經過實際模型建置與應用檢驗，因此可作為本研究主要重力資料來源。

外海重力資料則採用 Scripps Institution of Oceanography (SIO) 發布之全球海洋重力異常模型 (Sandwell et al., 2021)。此模型利用衛星測高資料反演海面高度變化，進一步推估海洋重力異常，可補充船載測線未涵蓋之廣大外海區域。由於臺灣周邊海域重力場對大地起伏模型具有重要影響，納入較新的全球海洋重力異常模型，有助於提升外海資料完整性，並改善研究區域邊界及海域資料銜接。

離島部分，本研究納入 2019 年公告之離島重力異常資料。離島與臺灣本島在空間上相互分離，若缺乏獨立重力觀測資料，該區域重力場可能描述不足。透過加入金門、馬祖、澎湖及其他離島之重力資料，可補充離島區域重力資訊，使整體資料空間分布更完整，並有助於提升本島與離島之間的大地起伏一致性。

為描述長波長重力場，本研究採用 EGM2008 全球重力場模型作為背景場。全球重力場模型可提供大尺度重力場資訊，區域重力資料則主要反映中、短波長變化。透過全球模型與區域資料結合，可建立兼具長、中、短波長訊號的重力場資料系統。

經由 Stokes 積分法、去除一計算一回復法及地形改正等處理後，可獲得新的重力法大地起伏模型，如圖 1 所示。由圖 1 可見，臺灣本島與周邊海域的大地起伏呈現明顯區域變化，其整體空間型態反映臺灣複雜地形、陸海交界及區域重力場變化的綜合影響。中高海拔山區與周邊海域之間的大地起伏差異，也說明重力法大地起伏模型能呈現研究區內連續且具有物理意義的大地起伏場。

綜合而言，本研究建立之 2025 年重力法大地起伏模型，雖然在基本理論與計算流程上延續 Hwang et al. (2020) 及內政部 2014 年公告模型之方法架構，但其實質差異在於資料條件之更新與模型應用範圍之精進。相較於既有公告成果，本研究採用內政部 2024 年公告之 20 m 解析度 DEM，以提升地形改正對山區及地形快速變化區域之表現；納入 Sandwell et al. (2021) 之全球海洋重力異常模型，以補強臺灣周邊外海重力場資訊；並加入 2019 年公告之離島重力異常資料，以改善本島與離島之間的重力資料銜接。上述資料更新使 2025 年模型不僅是既有方法之延續，也是在最新地形、海域及離島重力資料條件下重新建立之模型成果。

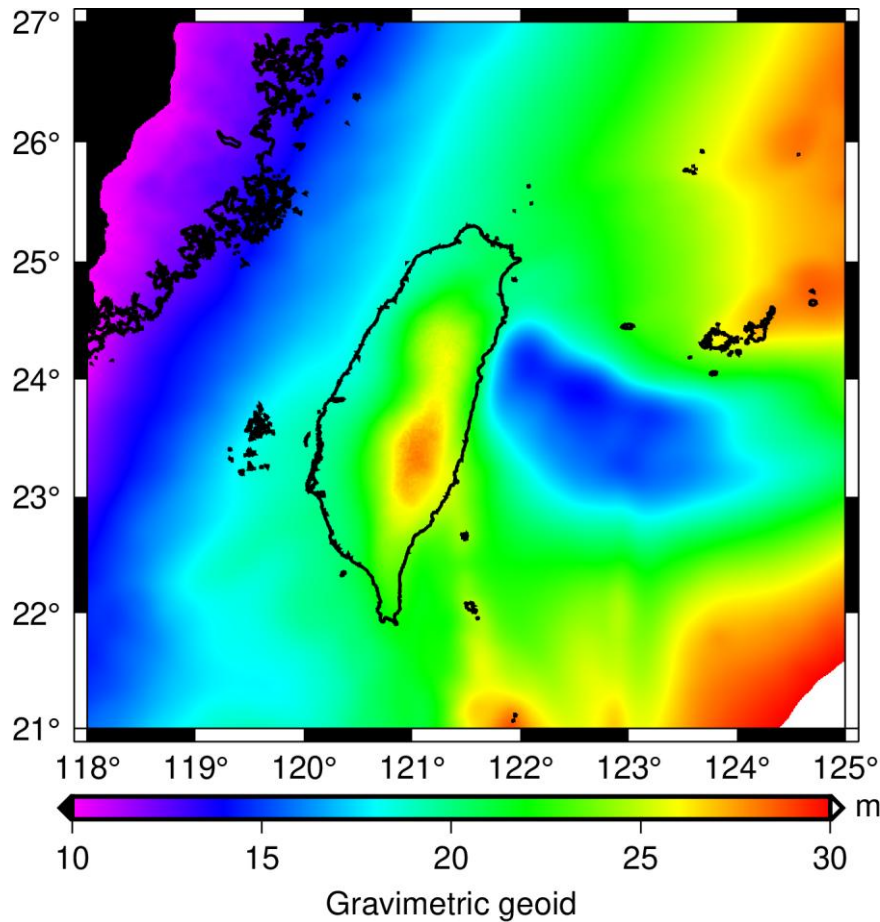


圖 1 2025 年臺灣重力法大地起伏模型。色階表示大地起伏值，單位為 m；模型呈現臺灣本島、離島及周邊海域之連續大地起伏變化。

(二) 新混合法大地起伏模型之建立

混合法大地起伏模型是在重力法大地起伏模型的基礎上，加入 GNSS/水準觀測大地起伏資料進行修正，使模型成果更接近現行高程基準，並更適合橢球高轉換為正高及工程測量應用。本研究採用之 GNSS/水準資料主要依據劉文業（2023）整理與評估之觀測大地起伏資料，並在本研究中進一步檢核與篩選後使用。依資料來源與性質，這些資料可分為五類，包括全臺灣觀測資料（Entire Taiwan, ET）、連續追蹤站資料（Continuously Operating Reference Station, CORS）、地震後復測資料（After Earthquake, AE）、地層下陷區域資料（Subsidence Area, SA），以及離島資料（Offshore Island, OI）。

其中，全臺灣觀測資料提供主要空間覆蓋；連續追蹤站資料補充長期穩定控制點；地震後復測資料強化地震影響區之高程資訊；地層下陷區域資料補足西南部沉陷區之觀測控制；離島資料則有助於改善本島與離島之間的模型銜接。經重複點檢核與資料篩選後，本研究最終採用 2159 筆 GNSS/水準觀測資料，作為混合法大地起伏模型建立與精度評估之基礎。圖 2 為 GNSS/水準觀測成果分布圖，表 2 為觀測資料彙整表。

建立混合法大地起伏模型前，需先處理 GNSS 橢球高與水準正高之觀測時間差及坐標框架一致性問題。混合法模型所使用的觀測大地起伏由 $N=h-H$ 計算而得，其中 h 為 GNSS 橢球高， H 為水準正高。本研究使用之 GNSS 橢球高統一採用 TWD97[2020] 坐標框架，水準正高則對應 TWVD2001 高程基準。若 GNSS 與水準資料觀測時間不同，且測點在兩次觀測期間發生地層下陷、地震後變形或長期地殼垂直運動，則由 $N=h-H$ 所得之 GNSS/水準觀測大地起伏，可能包含地表垂直位移所造成之非大地起伏訊號。此外，不同觀測時間亦可能伴隨 GNSS 坐標框架或資料處理基準之差異，使橢球高 h 產生系統性不一致。

為降低此類時間差所造成之影響，本研究依 Franklin and Huang (2022) 之垂直速度場，估計 GNSS 橢球高與水準正高因觀測時間差所對應之相對垂直位移，並對 GNSS 橢球高進行時間修正，使形成之觀測大地起伏較少受到地表垂直運動污染。此速度場之用途並非改變或追蹤物理大地水準面本身，也非將所有資料嚴格化算至單一共同曆元，而是用以降低不同觀測時間所造成之幾何大地起伏誤差。

所有資料均依上述相同原則處理，以維持不同資料類別之時間修正與框架處理一致性。其中，CORS 資料因 GNSS 橢球高成果與水準正高成果之時間差可能較大，若未進行垂直位移修正，較容易產生時間差與高程基準混雜所造成之假性大地起伏差異。因此，本研究特別利用垂直速度場降低此類資料中由觀測時間不一致所造成之影響，再將修正後之 GNSS/水準觀測大地起伏作為混合法大地起伏模型修正面建立之基礎。

完成觀測資料之時間與框架一致化處理後，本研究將重力法大地起伏模型內插至 GNSS/水準觀測點，並與修正後之觀測大地起伏逐點比較。兩者差值可視為重力法大地起伏模型相對於 GNSS/水準觀測資料及現行高程基準的區域差異。為避免僅使用全部 GNSS/水準資料進行樣本內評估而高估模型精度，本研究將觀測大地起伏資料分為約制資料與驗證資料。分組比例並非任意設定，而係在比較不同約制／驗證比例後，同時考量約制點數量、驗證點數量及空間分布代表性後決定。由於 GNSS/水準點位在臺灣西部及部分特定區域較為密集，若驗證點比例過低，將不利於反映模型於不同區域之整體表現；若約制點比例過低，則可能降低混合法修正面建立之穩定性。綜合比較後，本研究採用 70% 資料作為修正面建立之約制資料，剩餘 30% 則保留作為未參與修正面建立之獨立驗證資料，以在修正面建置穩定性與獨立驗證可靠性之間取得較佳平衡。

修正面建立完成後，將其加入重力法大地起伏模型，即可得到混合法大地起伏模型。圖 3 為本研究最終混合法大地起伏模型成果。由圖中可見，混合法大地起伏模型仍保留重力法大地起伏模型的整體空間趨勢，但因加入 GNSS/水準觀測資料作為約束，其與現行高程基準之相容性獲得提升。尤其在 GNSS/水準點位較密集的區域，混合法模型能有效修正重力法模型與觀測大地起伏之間的區域性差異。

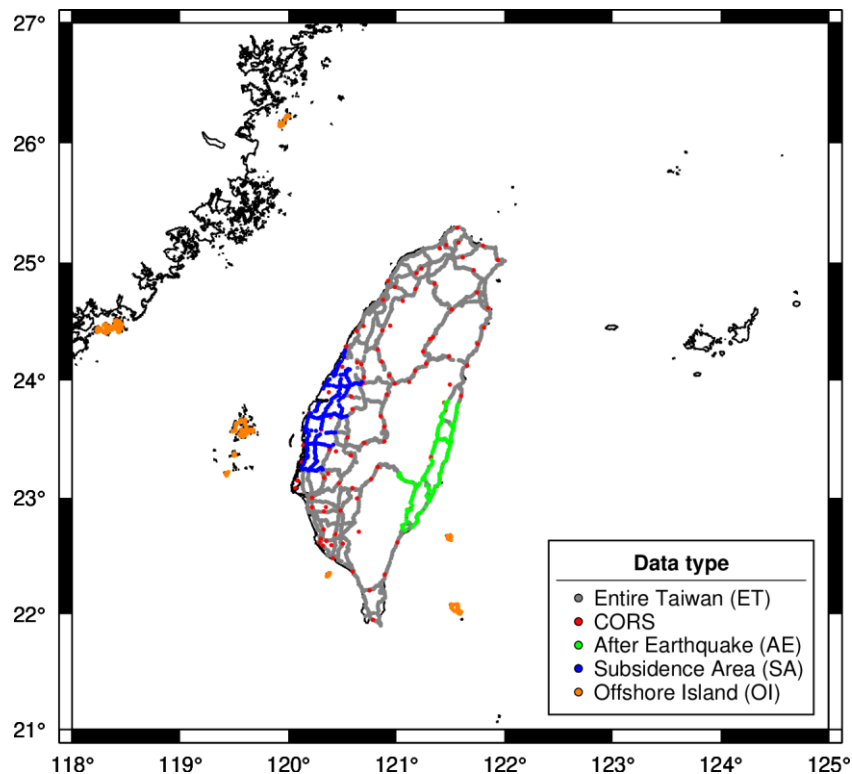


圖 2 GNSS/水準觀測大地起伏資料分布。不同顏色表示全臺灣觀測資料、連續追蹤站、地震後復測、地層下陷區域及離島資料，作為混合法大地起伏模型建立與精度評估之基礎。

表 2 GNSS/水準觀測大地起伏資料彙整

資料類別	GNSS 觀測時間	水準測量觀測時間	資料數	備註
全臺灣 (Entire Taiwan, ET)	2021/11 - 2022/02	2020/06 - 2021/05	1682	全國性 GNSS 與一等水準測量成果
連續追蹤站 (Continuously Operating Reference Station, CORS)	2020	2009 - 2019	102	所選 CORS 站正高於 2022 至 2023 年間計算
地震後復測 (After Earthquake, AE)	2022/11 - 2022/12	2023/03 - 2023/05	158	地震後重新測量成果

地層下陷區域 (Subsidence Area, SA)	2021/11 – 2022/02	2022/10 – 2023/02	213	地層下陷重點監測區資料
離島資料 (Offshore Island, OI)	-	-	165	採用 Huang et al. (2021) 之離島資料
原始資料合計			2320	
刪減資料數			161	刪除坐標相同但點名不同之基準點
使用資料數			2159	用於混合法大地起伏模型建立與精度評估

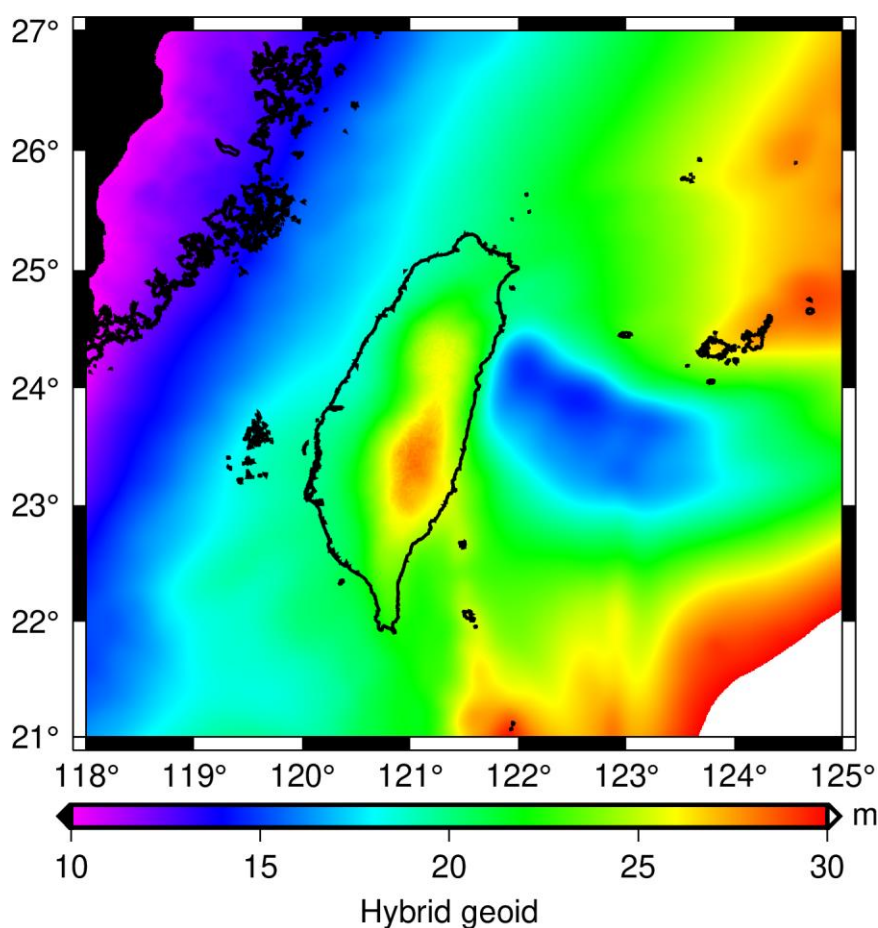


圖 3 2025 年臺灣混合法大地起伏模型。色階表示大地起伏值，單位為 m；模型保留重力法大地起伏模型之整體空間趨勢，並透過 GNSS/水準資料修正其與現行高程基準之差異。

(三) 大地起伏模型精度評估

本研究之精度評估分為兩部分。第一，使用保留之 30% GNSS/水準資料進行獨立驗證，以檢核模型對未參與修正面建立資料的預測能力。第二，利用整體 GNSS/水準資料檢視模型與全部觀測資料之整體一致性。前者可較客觀評估模型於未知點位的表現，後者則可反映模型與現有高程控制資料之整體符合程度。

1. 獨立驗證成果

獨立驗證使用未參與修正面建立之 30% GNSS/水準觀測資料，可避免模型精度僅反映約制點的擬合效果，進而較客觀評估模型對未知點位之預測能力。表 3 為重力法大地起伏模型與混合法大地起伏模型於獨立驗證點之差值統計，差值定義為模型大地起伏值減去 GNSS/水準觀測大地起伏值。

重力法大地起伏模型與獨立驗證資料之差值最小值為 -0.640 m、最大值為 0.106 m、平均值為 -0.222 m、均方根為 0.236 m、標準差為 0.079 m。相較之下，混合法大地起伏模型與獨立驗證資料之差值最小值為 -0.159 m、最大值為 0.171 m、平均值為 0.003 m、均方根為 0.041 m、標準差為 0.041 m。

此結果顯示，重力法大地起伏模型相對於 GNSS/水準觀測資料存在明顯負向平均差，表示重力法模型的大地起伏值整體偏小，反映其與現行高程基準之間仍有系統性差異。由於正高可由 $H=h-N$ 求得，若採用偏小的重力法大地起伏值 N ，則由 LiDAR、UAV 或其他測量方式取得之橢球高 h 轉換而得的正高 H 將可能偏高。對低平海岸地區而言，這種正高偏高的情形可能導致地面高程被高估，進而低估沿海淹水、暴潮或海平面上升影響範圍，對海岸災害評估並不理想。

經混合法修正後，模型與 GNSS/水準觀測資料之平均差已接近 0，均方根亦由 0.236 m 降至 0.041 m，顯示混合法模型能有效降低重力法模型與現行高程基準之差異，並明顯提升模型對未參與建模點位的預測能力。此結果也說明，對 GNSS、LiDAR、UAV 或衛星測量所得橢球高之正高化，以及海岸低地淹水風險分析而言，混合法大地起伏模型較適合作為實務應用之高程轉換基礎。

表 3 重力法與混合法大地起伏模型獨立驗證結果(差值＝模型大地起伏值減 GNSS/水準觀測大地起伏值;單位：m)

模型	最小值	最大值	平均值	均方根	標準差
重力法	-0.640	0.106	-0.222	0.236	0.079
混合法	-0.159	0.171	0.003	0.041	0.041

2. 整體 GNSS/水準資料評估

除獨立驗證外，本研究亦使用整體 GNSS/水準資料評估模型與所有觀測資料之一致性。表 4 列出不同資料類別下，重力法大地起伏模型與混合法大地起伏模型相對於 GNSS/水準資料之差值統計。

以全部資料而言，重力法大地起伏模型之差值最小值為 -0.660 m、最大值為 0.128 m、平均值為 -0.224 m、均方根為 0.241 m、標準差為 0.088 m。混合法大地

起伏模型之差值最小值為 -0.159 m 、最大值為 0.171 m 、平均值為 0.001 m 、均方根為 0.024 m 、標準差為 0.024 m 。此結果顯示，混合法模型不僅在獨立驗證中具有較佳表現，在整體 GNSS/水準資料上也展現更高一致性。

表 4 亦顯示，各資料類別中，混合法大地起伏模型之平均差與均方根均小於重力法大地起伏模型。重力法模型在離島資料類別中的標準差較大，可能反映離島區域存在較明顯之區域偏移、資料銜接問題或垂直基準差異；經混合法修正後，離島資料之平均差與標準差均明顯降低，顯示混合法修正對離島區域具有良好效果。對全臺灣、連續追蹤站、地震後與地層下陷區資料而言，混合法模型之均方根多維持於數公分等級，說明其在不同區域及資料類別中均具有穩定表現。

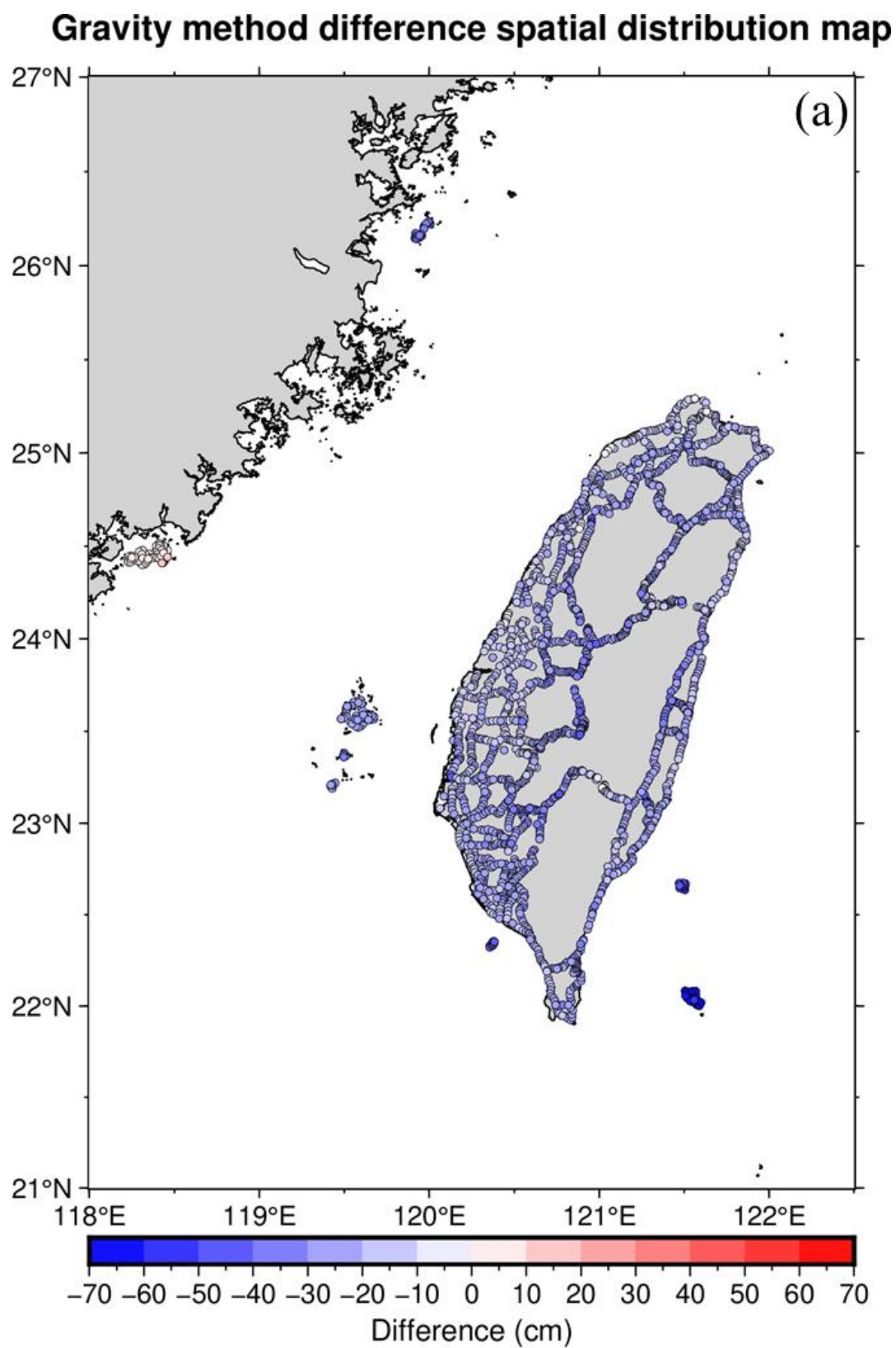
由整體 GNSS/水準資料評估可知，混合法修正不僅降低平均差，也明顯縮小不同資料類別間的差異，使模型在本島、離島、地震後復測區及地層下陷區均具有較穩定的表現。此結果說明，混合法大地起伏模型較能滿足現行高程基準下之橢球高轉換為正高與實務測量需求，並可降低 LiDAR、UAV 或衛星測量所得地形資料正高化及海岸低地高程判釋時的系統性偏差。

為進一步檢視模型差值是否具有空間系統性，本研究將重力法及混合法大地起伏模型分別與整體 GNSS/水準觀測大地起伏資料進行逐點比較，其差值空間分布如圖 4 所示。由圖 4(a) 可看出，重力法模型差值於多數 GNSS/水準點呈現負值，顯示重力法大地起伏模型相對於現行 GNSS/水準觀測成果具有一致性的負向偏差。此空間分布特徵與整體統計結果相符，說明重力法模型與 TWVD2001 現行高程基準之間仍存在系統性差異。圖 4(b) 顯示混合法模型差值明顯趨近於 0，且正負差值之空間分布較為分散，未呈現如重力法模型般明顯且一致的大尺度負向偏差。此結果表示，混合法模型透過 GNSS/水準觀測大地起伏資料建立修正面後，可有效降低重力法模型與現行高程基準之間的系統性差異，並提升模型與整體 GNSS/水準資料之一致性。

表 4 整體 GNSS/水準資料對重力法與混合法大地起伏模型之評估結果(差值＝模型大地起伏值減 GNSS/水準觀測大地起伏值;單位: m)

模型	GNSS/水準資料類別	最小值	最大值	平均值	均方根	標準差
重力法	全臺灣	-0.441	-0.027	-0.227	0.235	0.062
	連續追蹤站	-0.418	-0.026	-0.225	0.234	0.062
	地震後復測	-0.438	-0.067	-0.179	0.189	0.061
	地層下陷區域	-0.319	-0.119	-0.185	0.189	0.037
	離島	-0.660	0.128	-0.249	0.339	0.231
	全資料類別	-0.660	0.128	-0.224	0.241	0.088

混合法	全臺灣	-0.159	0.171	0.001	0.026	0.026
	連續追蹤站	-0.052	0.094	0.006	0.022	0.021
	地震後復測	-0.054	0.101	0.002	0.020	0.020
	地層下陷區域	-0.057	0.107	0.002	0.021	0.021
	離島	-0.046	0.037	0.001	0.010	0.010
	全資料類別	-0.159	0.171	0.001	0.024	0.024



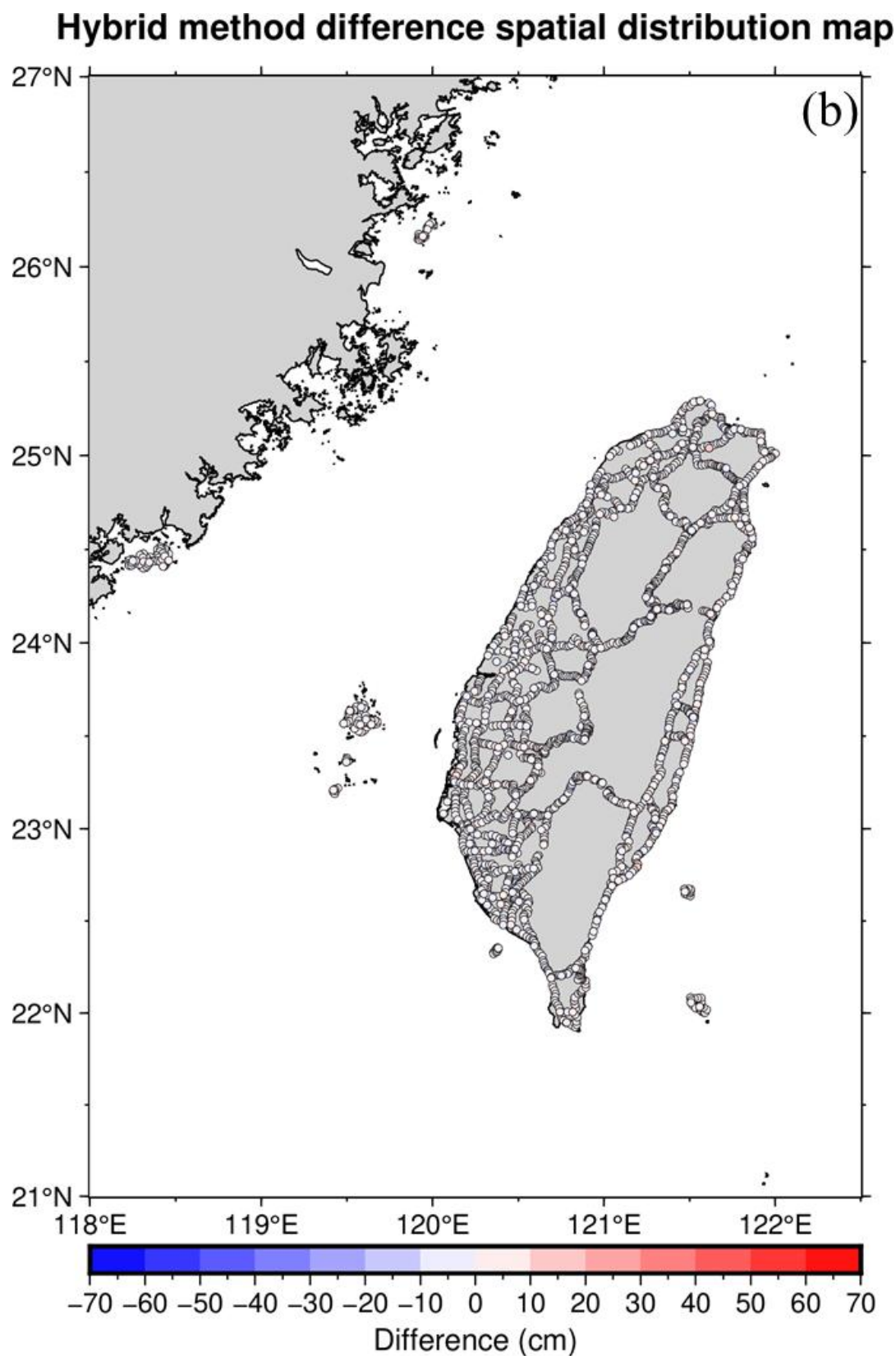


圖 4 大地起伏模型與整體 GNSS/水準資料之差值空間分布圖(a)重力法大地起伏模型與整體 GNSS/水準資料之差值(b)混合法大地起伏模型與整體 GNSS/水準資料之差值

五、結論與討論

(一) 結論

本研究以臺灣本島、周邊海域及離島為研究範圍，整合陸測重力、船載重力、空載重力、衛星測高海洋重力異常、離島重力資料、全球重力場模型、內政部公告之 20 m DEM，以及 GNSS/水準觀測大地起伏資料，建立 2025 年臺灣重力法與混合法大地起伏模型，並以獨立驗證資料及整體 GNSS/水準資料評估其精度與實務適用性。

1. 重力法大地起伏模型具有明確的物理基礎，但其實務精度取決於資料品質與處理策略。實際模型精度仍受到重力資料品質、全球重力場模型、地形改正、長短波長分離、資料格網化及誤差控制等因素共同影響。對臺灣而言，劇烈地形、山區重力資料不足、近岸資料銜接、離島基準及海陸交界問題，使重力法大地起伏模型之建構更具挑戰。
2. 本研究建立之重力法大地起伏模型可呈現臺灣本島、離島及周邊海域連續的大地起伏場，並反映區域重力場與地形變化特徵。然而，與 GNSS/水準觀測大地起伏比較後，重力法模型在獨立驗證資料中呈現約 -0.222 m 的平均差，在整體 GNSS/水準資料中亦呈現約 -0.224 m 的平均差。此結果顯示，重力法模型與 TWVD2001 現行高程基準之間仍存在系統性差異。此差異顯示物理基準面與現行高程系統之間存在系統性基準偏移(datum offset)，而非表示重力法模型本身錯誤。
3. 混合法大地起伏模型透過 GNSS/水準觀測大地起伏資料建立修正面，可有效銜接重力法模型與現行高程基準。獨立驗證結果顯示，混合法模型之平均差降至 0.003 m，均方根降至 0.041 m；整體 GNSS/水準資料評估亦顯示，混合法模型之平均差為 0.001 m，均方根為 0.024 m。此結果說明，混合法模型能保留重力法模型的空間連續性與物理基礎，同時提高其與 TWVD2001 及現行測量成果之一致性。
4. 混合法大地起伏模型較適合作為橢球高轉換為正高之實務模型。由於正高可由 $H=h-N$ 求得，若使用偏小的重力法大地起伏值 N ，則由 GNSS、LiDAR、UAV 或衛星測量所得之橢球高 h 轉換得到的正高 H 可能偏高。對低平海岸地區而言，這可能造成地面高程被高估，進而低估沿海淹水、暴潮或海平面上升影響範圍。混合法模型可降低此類系統性偏差，因此較適合用於正高化及海岸低地災害評估。

(二) 建議

依據本研究成果，提出以下建議，供後續模型更新、國家高程基準維護及實務應用參考。

1. 應持續更新重力資料，特別是近岸、山區與離島區域。本研究所使用之陸測重

- 力、船載重力與空載重力資料，多數仍以 2014 年以前建立之資料為主。未來若能增加近岸船載重力測線、補強山區重力控制，並持續取得離島重力資料，將有助於提升重力法大地起伏模型之精度、空間覆蓋與區域穩定性。
2. 應持續更新 GNSS/水準共同點，並重視觀測時間與坐標框架一致性。混合法大地起伏模型之品質高度依賴 GNSS/水準共同點之精度、空間分布及資料一致性。未來應加強山區、地層下陷區、地震影響區及離島地區之觀測控制，並將 GNSS 橢球高與水準正高儘可能修正至一致的觀測時間與坐標框架，以避免地表變形或框架差異被誤納入混合法模型修正面。
 3. 官方發布成果時，宜明確區分重力法模型與混合法模型之用途。重力法大地起伏模型適合用於描述區域重力場與大地水準面空間變化；混合法大地起伏模型則較適合用於將 GNSS、LiDAR、UAV 或衛星測量所得之橢球高轉換為正高。清楚標示兩類模型的用途與限制，可避免使用者將尚未銜接 TWVD2001 的重力法模型直接用於工程高程轉換。
 4. 建議建立定期更新與版本管理機制。大地起伏模型已成為高程現代化、工程測量、地形製圖及災害評估的重要基礎資料。未來應記錄各版本所使用之重力資料、地形資料、GNSS/水準資料、坐標框架、觀測時間、地表變形修正方式及精度評估結果，以提高模型成果之可追溯性，並協助使用者依不同應用需求選擇適當版本。
 5. 建議後續評估 GNSS/水準點位密度與空間分布對混合法大地起伏模型精度之影響。本研究使用之 GNSS/水準觀測大地起伏資料雖已涵蓋全臺灣及不同資料類別，但點位仍多集中於西部及平原地區，山區、東部、海陸交界與部分離島資料相對稀疏。未來可透過不同點位密度情境或空間區塊抽樣方式，分析資料分布對平均差、RMS、標準差及殘差空間型態之影響，以提高混合法模型於資料稀疏區域之可靠性評估。

資料可用性

官方數值大地起伏模型應向內政部地政司或國土測繪中心取得。

致 謝

本研究所述大地起伏模型之建置，承蒙內政部地政司及國家科學及技術委員會經費支持。感謝國立成功大學測量及空間資訊學系與國立中興大學之合作夥伴在模型建置與相關研究上的協助。研究助理方冠翔協助整理表 1 之文獻資料，並依據內政部最新(2025 年)計畫報告彙整與摘要第 4 節之相關內容，作者在此一併致謝。

參考文獻

- 崔國強，1995，臺灣地區數值大地水準面模型計算之研究，國立中央大學地球物理學系博士論文。
- 楊名、陳俊廷，1999，聯合水準、GPS、重力法大地起伏值觀測資料之台灣高程系

- 統精度預估。《地籍測量：中華民國地籍測量學會會刊》，第 18 卷，第 4 期，頁 1-24。
- 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，國立成功大學測量工程學系碩博士班博士論文。
- 黃金維、許宏銳、黃啟訓，2013，新一代台灣大地水準面模式：防災、監測、高程現代化之應用，國土測繪與空間資訊，第 1 卷，第 1 期，頁 57-81。
- 許宏銳，2014，最佳化重力資料處理及整合以建構公分級台灣大地起伏模式，國立陽明交通大學土木工程學系博士論文。
- 劉文業，2023，評估 2023 觀測大地起伏以改進台灣大地水準面模型，國立陽明交通大學土木工程學系碩士論文。
- 楊致逸、蕭宇伸，2026，陸海交界處大地起伏建模精度探討：以臺灣東部為例，航測及遙測學刊，第 31 卷，第 1 期，頁 21- 35。
- Franklin, K. R., & Huang, M. H. ,2022, Revealing crustal deformation and strain rate in Taiwan using InSAR and GNSS. *Geophysical Research Letters*, 49(21), e2022GL101306.
- Hofmann-Wellenhof, B., & Moritz, H. ,2006, *Physical Geodesy*. (2nd edition ed.) Springer.
- Hsiao, Y. S., Hwang, C., Wu, M. L., & Chang, J. C. ,2017, Improved geoid modeling using observed and modeled gravity gradients in Taiwan. *Journal of Surveying Engineering, ASCE*, 143(2).
- Huang, W., Cheng, C. C., Hwang, C., Yu, D., Chen, T. W., & Chen, Y. T. ,2021, The 2021 gravimetric and hybrid geoid models for Taiwan and offshore islands: Application to a seamless vertical datum. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 32(5).
- Huang, C. J., & Han, J. Y. ,2023, An adaptive approach to optimise regional geoid undulation model for engineering applications. *Survey Review*, 55(391), pp.308-324.
- Hwang, C. ,1997, Analysis of some systematic errors affecting altimeter-derived sea surface gradient with application to geoid determination over Taiwan. *Journal of Geodesy*, 71, pp.113-130.
- Hwang, C., Hsiao, YS., Shih, HC., Yang, M., Chen, KH., Forsberg, R., and Olesen, A.V. ,2007, Geodetic and geophysical results from a Taiwan airborne gravity survey: Data reduction and accuracy assessment. *Journal of Geophysical Research*, 112 , B04407.
- Hwang, C., Hsu, H. J., Featherstone, W. E., Cheng, C. C., Yang, M., Huang, W., Wang, C. Y., Huang, J. F., Chen, K. H., Huang, C. H., Chen, H., & Su, W. Y. ,2020, New gravimetric-only and hybrid geoid models of Taiwan for height modernisation, cross-island datum connection and airborne LiDAR mapping. *Journal of Geodesy*, 94(9), Article 83.

- Hwang, C., Shen, W. B., Li, X., & Din, A. H. M. ,2021, Introduction to the special issue on gravity and geoid in the Asia Pacific. TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 32(5), 7.
- Sandwell, DT, Harper, H., Tozer, B., and Smith, WH.,2021, Gravity field recovery from geodetic altimeter missions. Advances in Space Research, 68(2), pp.1059-1072.
- You, R. J. ,2006, Local geoid improvement using GPS and leveling data: Case study. Journal of Surveying Engineering, 132(3), pp.101-107.

利用全球導航衛星系統干涉反射技術建立臺灣高程基準之可行性評估

李啓民^{1*}、郭重言²、藍文浩³、陳鶴欽⁴、康寧凱⁵

論文收件日期：115.04.29

論文修改日期：115.06.03

論文接受日期：115.06.12

摘 要

本研究評估利用全球導航衛星系統干涉反射技術(Global Navigation Satellite System Interferometric Reflectometry, GNSS-IR)建立臺灣高程基準之可行性。以高雄港共站 GNSS 與潮位站資料為研究對象，分析 2005 年至 2016 年間之觀測資料。首先利用 GNSS 訊噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)資料進行反射面高度反演，並透過精密單點定位(Precise Point Positioning, PPP)解算天線橢球高，進而推估海水面橢球高。為提升反演精度，本研究考慮海水面動態變化、對流層折射及 GNSS 頻間偏差等誤差改正，並結合潮汐調和分析輔助頻譜分析。結果顯示，GNSS-IR 所推估之海水面橢球高與潮位站觀測具有高度一致性，其變化趨勢相關係數達 0.87，線性迴歸斜率為 0.99，決定係數(R^2)高達 0.9999，顯示 GNSS-IR 技術能有效監測海水面變化。然而，兩者之間仍存在-12.7 cm 之系統性基準偏差。此差異最可能源自於垂直方向系統性誤差及海況偏差，惟兩者對總體偏差之貢獻程度仍有待進一步探討。整體而言，在扣除基準差異後，GNSS-IR 於動態海水面監測上展現良好一致性與穩定性。本研究結果證實，GNSS-IR 技術具備推估長期平均海水面橢球高之能力，並可作為潮位站觀測之補充，甚至在觀測稀缺區域具備替代潛力，對於未來高程基準現代化具有重要應用價值。

關鍵詞：GNSS-IR、海水面橢球高、高程基準、海水面監測

^{1*} 助理教授，國立成功大學測量及空間資訊學系，TEL:(06)2757575 # 63828，Email: cmlee@gs.ncku.edu.tw。

² 教授，國立成功大學測量及空間資訊學系。

³ 助理教授，國立高雄科技大學土木工程學系。

⁴ 科長，內政部國土測繪中心。

⁵ 技士，內政部國土測繪中心。

The Feasibility Assessment of Defining Taiwan's Vertical Datum using GNSS-IR Technique

Chi-Ming Lee^{1*}, Chung-Yen Kuo², Wen-Hau Lan³, He-Chin Chen⁴, Ning-Kai Kang⁵

Abstract

This study evaluates the feasibility of using Global Navigation Satellite System Interferometric Reflectometry (GNSS-IR) to establish Taiwan's vertical datum. The co-located GNSS station and tide gauge at Kaohsiung Harbor were used, covering observations from 2005 to 2016. GNSS signal-to-noise ratio (SNR) data were analyzed to retrieve reflector heights, and Precise Point Positioning (PPP) was applied to estimate antenna ellipsoidal heights, enabling the derivation of ellipsoidal sea surface heights. To improve retrieval accuracy, several error sources were considered, including sea surface dynamics, tropospheric refraction, and inter-frequency bias. In addition, tidal harmonic analysis was incorporated to constrain spectral peak identification in the Lomb–Scargle periodogram (LSP). The results show strong agreement between GNSS-IR and tide gauge observations, with a correlation coefficient of 0.87, a regression slope of 0.99, and a coefficient of determination (R^2) of 0.9999. These findings indicate that GNSS-IR effectively captures sea level variability. However, a systematic datum offset of -12.7 cm was observed between the two datasets. The most likely sources of this discrepancy are systematic vertical-related errors and sea state bias, although their respective contributions require further investigation. Overall, after accounting for datum differences, GNSS-IR demonstrates high consistency and reliability in monitoring sea level variations. The results confirm that GNSS-IR is a promising technique for estimating long-term mean ellipsoidal sea surface height and can serve as a complementary or alternative observation method to tide gauges, especially in regions with sparse observations.

Keywords: GNSS-IR, Ellipsoidal Sea Surface, Vertical Datum, Sea Level Monitoring

^{1*} Assistant Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University, TEL : +886-6-2757575 #63828 , E-mail: cmlee@gs.ncku.edu.tw.

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

³ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

⁴ Section Chief, National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior.

⁵ Technical Specialist, National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior

一、前 言

高程基準(Vertical datum)係用以描述地表高程的參考面，廣泛應用於測量、工程實務與地理資訊系統等領域。其核心概念涉及多種參考面，包括真實地球表面、大地水準面(geoid)、參考橢球面以及平均海水面(Mean Sea Surface, MSS)等，這些參考面共同構成高程系統之理論基礎。正高(orthometric height)係以大地水準面為基準，表示地表點沿重力方向至大地水準面的垂直距離；相對地，橢球高(ellipsoidal height)則為地表點至參考橢球面的垂直距離(又稱幾何高)。若海水面僅受重力影響，其應與大地水準面重合；然而實際海洋受海流、風場、溫鹽結構與氣壓等動力因素影響，兩者之間仍存在系統性差異，此差異通常以平均動力海面地形表示[Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006]。此外，平均海水位(Mean Sea Level, MSL)和平均海水面(MSS)雖名稱相近，但其物理意義不同：前者為潮位站經長期觀測所得之海水位平均高度，用來描述區域的高程基準；後者則是透過衛星測高技術所推估之全球海面平均位置，通常以參考橢球面為基準[史天元，2022]。

傳統正高高程系統多以平均海水位作為水準零點，可提供一個長期穩定之參考面[劉啟清，1998]。實務上，若潮位站設置於穩固地質條件(如岩盤)上，且觀測時間長度足以涵蓋完整主要潮汐週期 (>18.6 年)，直接平均潮位資料能消除各項影響海水位的地球物理因子，求得一穩定的平均海水位，以作為正高高程系統之水準零點。臺灣本島水準零點係定義在 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境情況下，由基隆潮位站 1957 年至 1991 年之潮位資料計算求得之平均海水位，並命名為 2001 臺灣高程基準(TaiWan Vertical Datum 2001，簡稱 TWVD 2001)。

隨著全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)技術之發展，基於訊號反射原理之 GNSS 干涉反射技術(GNSS Interferometric Reflectometry, GNSS-IR)逐漸成為一種具潛力之海面觀測工具。該方法利用 GNSS 接收儀之訊號(Signal-to-Noise Ratio, SNR)資料，透過頻譜分析(如 Lomb-Scargle Periodogram, LSP)推估反射面高度，進而反演相對海水面變化[Larson *et al.*, 2013a]。相關研究顯示，GNSS-IR 所求得海水位與傳統潮位站觀測具有高度一致性，其均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)約為 10 cm 等級，顯示其在沿岸海平面監測之潛力[Larson *et al.*, 2013a]。此外，進一步結合 GNSS 所推估之地表垂直運動(vertical land motion, VLM)，可將相對海水位轉換為絕對海水面變化[Peng *et al.*, 2021]。長期觀測結果可用以推估平均海水面橢球高，進而建立獨立於潮位站之水準零點，並與傳統高程基準進行比較，以評估 GNSS-IR 技術在未來高程基準建置與現代化中的應用潛力。

二、研究區域與資料

(一) 研究區域

本研究選定臺灣高雄港作為研究區域，主要考量其具備潮位站與 GNSS 測站共址之觀測條件，有利於進行 GNSS-IR 之驗證與分析。相較之下，基隆潮位站雖為臺

灣高程基準之定義基準站，然其周邊缺乏適合進行 GNSS-IR 反演之共站或鄰近 GNSS 觀測資料，故不適合作為本研究之測試場域。

高雄港區具備完善之潮位觀測系統與長期 GNSS 連續觀測資料，可同時提供海水位變化與地表垂直運動資訊。於本研究中，利用共站 GNSS 測站之 SNR 資料進行反射訊號分析，以反演相對海水位變化；同時，透過 GNSS 載波觀測資料進行精密單點定位解算，以獲取天線之橢球高及其時間變化，用於後續地表垂直運動之改正。高雄港潮位站與 GNSS 測站之空間配置如圖 1 所示，兩者距離近且觀測環境一致，有利於降低空間差異所造成之誤差。



圖 1 高雄港潮位站和 GNSS 站設置[圖片來源: 國土測繪中心]。

(二) 研究資料

本研究使用高雄 GNSS 測站(KASH)自 2005 年 11 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日之連續觀測資料進行分析，並搭配高雄港潮位站資料作為驗證。GNSS 資料主要包含 SNR 觀測量與定位所需之載波與電碼觀測值，用以分別進行 GNSS-IR 海水位反演及測站天線位置解算。

在星系與頻率方面，2005 年 11 月 1 日至 2013 年 6 月 13 日期間僅提供 GPS 單星系資料；自 2013 年 6 月 14 日起，資料包含 GPS 與 GLONASS 雙星系觀測。所使用之 SNR 頻率包括 GPS 之 L1、L2 與 L5 頻段，以及 GLONASS 之 L1 與 L2 頻段。多頻與多星系資料之引入有助於提升觀測幾何分布與反演穩定性。潮位資料方面，採用高雄港潮位站(ID: 1486)之觀測資料，其時間解析度為每 6 分鐘一筆，具有高時間連續性，可作為 GNSS-IR 反演結果之參考與驗證。表 1 彙整本研究使用之 GNSS 與潮位站資料基本資訊，包括測站名稱、資料期間、取樣頻率及資料來源。

表 1 GNSS 與潮位站資訊

測站	資料時間	取樣頻率	資料來源
GNSS(KASH)	2005/11/01~2016/12/31	每 30 s 一筆	中央氣象署
潮位站(ID:1486)		每 6 分鐘一筆	

三、研究方法

(一) GNSS-IR 原理

本研究採用右旋圓極化(Right-Hand Circular Polarization, RHCP)之 GNSS 天線進行觀測。該類型天線除可接收衛星所發射之直接訊號外，亦能接收來自反射面(如海面)之反射訊號。由於兩者訊號傳播路徑不同而產生相位差，進而在接收之 SNR 觀測量中形成週期性干涉震盪。此干涉特性可用於計算反射面幾何資訊，其中天線相位中心至反射面之垂直距離定義為反射面高度(reflector height)。在本研究中，將由 SNR 資料反演所得之反射面高度進一步轉換為海水位高度，以分析海面變化特性。GNSS 直接訊號與反射訊號傳播路徑與幾何關係如圖 2 所示。

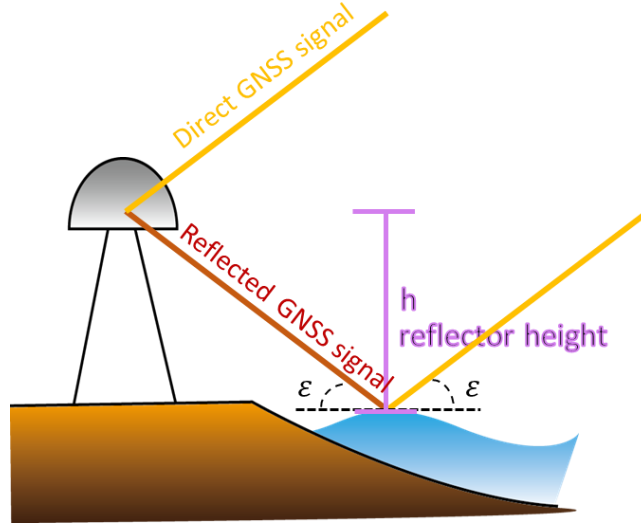


圖 2 GNSS-IR 應用於海水面高度反演之幾何示意圖。

SNR 資料提供另一種分析 GNSS 多路徑效應的方法，對於各 GNSS 頻率(如 L1、L2 或 L5)，接收機皆可透過載波追蹤迴路(Carrier Tracking Loop)計算對應之 SNR 值 [Bilich & Larson, 2007]。為提取反射訊號所攜帶之資訊，需先從原始 SNR 資料中去除由直接訊號貢獻之低頻趨勢。常見方法包括利用低階多項式進行擬合並加以移除 [Bilich *et al.*, 2008; Larson *et al.*, 2013a]，或採用高通濾波器以分離高頻多路徑成分 [Benton & Mitchell, 2011]。

本研究採用 Larson 等人[2013a]所提出之方法，對原始 SNR 資料擬合並移除二階多項式，以消除直接訊號之影響。經處理後之殘餘訊號稱為除趨勢訊噪比(detrended SNR, δSNR)，其中主要包含由多路徑效應所引起之干涉訊號，可表示如下 [Larson *et al.*, 2013a]：

$$\delta\text{SNR} = A\cos(\psi + \varphi) = A\cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\sin(\varepsilon) + \varphi\right) \quad (1)$$

其中 A 、 ψ 、 φ 分別為振幅、相位及相位偏移， h 為反射面高度， λ 為 GNSS 載波波長， ε 為衛星仰角。從式(1)中，若忽略相位偏移，代表 δSNR 振盪頻率取決於相位。因此，

可透過相位隨時間得變化率計算反射訊號震盪頻率(f_ψ)如式(2)：

$$f_\psi = \frac{d\psi}{dt} = \frac{4\pi h}{\lambda} \sin \varepsilon + \left(\frac{4\pi h}{\lambda} \cos \varepsilon \right) \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

由於反射訊號相位與衛星仰角正弦值($\sin \varepsilon$)呈線性關係，當反射面高度固定時， δSNR 訊號可視為在 $\sin \varepsilon$ 空間中的週期性震盪。因此，可透過變數變換規則將式(2)中以時間為基準的相位變化率，改寫成以 $\sin \varepsilon$ 為基準的震盪頻率，進而得到式(3)：

$$f_{\delta SNR \rightarrow x = \sin \varepsilon} = \frac{d\delta SNR}{dx} = \frac{f_{\psi \rightarrow x = \sin \varepsilon}}{2\pi} = \frac{2h \tan \varepsilon}{\lambda} \frac{1}{\dot{\varepsilon}} + \frac{2h}{\lambda} \quad (3)$$

假設在一個不隨時間變化(time-invariant)的海水面上，即反射面高度在特定時間間隔內是固定的，因此 $\dot{h}$ 可以忽略，而式(3)可以簡化為：

$$f_{\delta SNR \rightarrow x = \sin \varepsilon} = \frac{2h}{\lambda} \quad (4)$$

$$h = \frac{f_{\delta SNR \rightarrow x = \sin \varepsilon} * \lambda}{2}$$

透過式(4)，後續由頻譜分析確定 δSNR 隨 $\sin \varepsilon$ 之振盪頻率後即可計算反射面高度。

(二) GNSS SNR 資料約制

本研究透過限制衛星之方位角與仰角範圍，以確保所使用之 SNR 資料主要來自周圍海面之反射訊號。方位角限制與測站周遭環境密切相關，故本研究利用 Google Earth 影像判釋測站可觀測之海面方向，據以界定適當之方位角區間。另一方面，為進一步約制反射幾何條件，並確保反射訊號主要來自有效反射區域，則依據第一費涅爾區(First Fresnel Zone, FFZ)理論設定衛星仰角範圍，以評估反射面之貢獻[Löfgren *et al.*, 2014]。

(三) 誤差改正

1. 海面變化改正

Larson 等人[2013b]於潮差超過 7 m 之阿拉斯加 Kachemak 灣研究區，以及 Löfgren 等人[2014]的研究中均指出，在海水面快速變化之環境中，特定時間內反射面高度為固定值之假設將不再成立，亦即 δSNR 之頻率呈現時間相依性。在此情況下，反射幾何關係式中須同時考慮反射面高度變化率($\dot{h}$)和衛星仰角變化率($\dot{\varepsilon}$)之影響，以更真實反映動態海面條件。Larson 等人[2013b]透過迭代方法來解決上述問題，首先利用式(4)求得初步之反射面高度，接著考慮 $\dot{h}$ 與 $\dot{\varepsilon}$ 進行反射面高度修正，並透過多次迭代計算以獲得更精確的反射面高度估計。

2. 對流層折射改正

衛星訊號在大氣傳播過程中會受到對流層折射效應影響，進而導致訊號傳播路徑產生彎曲(bending effect)，使得觀測之衛星仰角與其幾何仰角之間出現差異。此一效應在低仰角條件下尤為顯著，並可能對反射面高度之反演結果造成系統性誤差。因此，為減少對流層折射對觀測幾何之影響，本研究利用當地氣象資料(包括大氣壓

力與氣溫)，估算折射所引致之仰角偏差，並依據式(5)對衛星仰角進行改正[Bennet, 1982]：

$$\delta\varepsilon = \frac{510}{\frac{9}{5}T + 492} \cdot \frac{P}{1010.16} \cot\left(\varepsilon + \frac{7.31}{\varepsilon + 4.4}\right) \quad (5)$$

其中， ε 和 $\delta\varepsilon$ 為衛星仰角和其改正值， T 為氣溫(°C)及 P 為壓力(hPa)。

3.頻間偏差(Inter-frequency bias)改正

在 GNSS-IR 應用中，當使用多頻率訊號時，必須考慮頻率間偏差(inter-frequency bias)。Wang 等人[2022]指出，不同頻率所反演之反射面高度結果之間存在系統性偏差，且此偏差與載波波長差異呈現線性相關。為了修正此問題，本研究透過最小二乘法估計頻率間偏差，並將各頻率之結果校正至與 GPS L1 頻率之結果一致。因此，其觀測方程式可表示為：

$$\Delta h_{IF} = a_{IF} * \Delta\lambda \quad (6)$$

其中， Δh_{IF} 表示相對於 GPS L1 頻率所推估之反射面高度差異， a_{IF} 為透過最小二乘法所估計之線性係數，而 $\Delta\lambda$ 則代表相對於 GPS L1 之載波波長差。此線性模型可有效描述頻率間系統性偏差，並作為多頻率 GNSS-IR 資料融合與校正之基礎。

(四) 調和分析輔助 Lomb Scargle Periodogram (LSP)法

1.Lomb Scargle Periodogram (LSP)

如前所述， δSNR 主要振盪頻率係透過頻譜分析方法加以估計。然而，由於 δSNR 資料在時間上並非均勻取樣，若直接採用快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)或其他傳統頻譜分析方法，將面臨顯著限制與困難。因此，本研究採用 LSP 方法，亦稱為最小二乘法頻譜分析(least-squares spectral analysis)，以處理不均勻取樣資料之頻譜特性[Larson *et al.*, 2013a]。LSP 方法最早由 Lomb[1976]提出，並由 Scargle[1982]進一步發展，透過考量週期圖之統計特性與可靠性，使其成為分析非均勻時間序列之有效工具。相關理論與數學細節可參考 Press 等人[1992]之說明。

假設有 N 個資料點 s_i (GNSS-IR 應用中為 δSNR)， $i = 1, \dots, N$ 。首先，計算 s_i 的平均值 $\bar{s}$ 和變異數 σ^2 ：

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^2}{(N - 1)} \quad (8)$$

接著，計算以角頻率為函數的光譜功率($\omega = 2\pi f > 0$)，則 Lomb 標準化的週期圖如下表示：

$$P_N(\omega) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{\left[\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s}) \cos(\omega)(t_i - \tau) \right]^2}{\sum_{i=1}^N \cos^2(\omega)(t_i - \tau)} + \frac{\left[\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s}) \sin(\omega)(t_i - \tau) \right]^2}{\sum_{i=1}^N \sin^2(\omega)(t_i - \tau)} \right\} \quad (9)$$

其中 t_i 是每個資料點的時間。在此情況下， t_i 用衛星仰角的正弦值($\sin \varepsilon$)代替，而 τ 是

偏移量。主要振盪頻率通常對應於頻譜中之最大功率峰值，並可透過式(4)轉換為反射面高度。然而，在實際應用中，週期圖中不一定僅存在單一顯著峰值；當資料品質不佳或受其他反射面訊號干擾時，可能出現多個主峰，導致難以判定對應之正確反射面高度。為提升反演結果之可靠性，本研究引入調和分析方法輔助 LSP 結果之判釋[*Lee et al.*, 2019]，藉由結合時間序列之週期性特徵，篩選出最具物理意義之頻率峰值，進而確定對應之反射面高度。

2. 潮汐調和分析(Tidal Harmonic Analysis)

本研究引入潮汐調和分析法，其主要目的包括：(a)對潮位資料進行預處理(粗差剔除)；(b)估算反射面高度(符號相反)之時間變化率，進而求得反射面高度變化率之校正項(對應式(3))，並將其加入原始反射面高度時間序列以進行修正；(c)利用調和分析所重建之潮位時間序列作為約束條件，輔助判定由 LSP 方法所推估之正確反射面高度[*Lee et al.*, 2019]。

潮汐為影響海水位變化最主要之因素，其變化可透過調和分析表示為多個已知頻率之正弦函數之線性組合[*Schwartz*, 2006]。本研究於潮位資料預處理中採用 37 個主要潮汐分潮進行分解，以完整描述潮汐訊號之組成[*Chang et al.*, 2012]。而在應用於反射面高度校正與峰值判定(即目的(b)與(c))時，則選取對臺灣周邊海域影響最顯著之全日潮(K1、O1)與半日潮(M2、S2)分潮進行分析，以兼顧模型簡化與物理代表性。

調和分析中之未知參數係透過最小二乘平差法估算而得，並據此重建海水位時間序列。該重建結果可作為海水位變化之約制條件，若已知研究區域之潮差範圍，亦可進一步納入先驗資訊以限制解算空間，從而縮小頻譜搜尋範圍，提升週期圖主峰識別之準確性。最終，透過迭代方式結合頻譜分析與潮汐約制條件，可逐步收斂至較為可靠之反射面高度解。

(五) GNSS 精密單點定位解算

本研究利用高雄港 GNSS 連續觀測站之資料進行精密單點定位解算，主要採用加拿大 Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning (CSRS-PPP)進行處理[*Tétreault et al.*, 2005]。CSRS-PPP 為一套線上(online)運算工具，透過全球 GNSS 觀測網所提供之精密衛星軌道、衛星時鐘及相關偏差改正參數，可於全球任意地點求解高精度之測站坐標，其靜態定位精度可達公分等級，若資料時間較長(如 12 小時、24 小時等)，其平面精度最高可達毫米(mm)等級[*Banville et al.*, 2021; *El & Miky*, 2019; *Lahaye et al.*, 2008;]。使用者可將觀測之 RINEX 資料(或其他允許之資料格式)上傳至該系統，並依需求選擇靜態或動態模式進行解算。其輸出結果可提供多種參考框架之坐標，包括加拿大空間參考系統(NAD83(CSRS))及國際地球參考框架(International Terrestrial Reference Frame, ITRF)。其中，ITRF 坐標解之曆元(epoch)與 GNSS 觀測時間一致，有利於後續進行地表垂直運動改正。

(六) 平均海水面計算

平均海水位(MSL)係指潮位站於特定時間期間內，所有有效潮位觀測值之平均結果。在高程測量應用中，通常以天體運行之章動週期(約 18.6 年)作為計算基準，藉由長期觀測資料求得之平均海水位，作為高程系統之基準零點[內政部，2020]。此作法可有效減弱長週期潮汐成分對結果之影響。一般而言，平均海水位之估算多採用算術平均法，並以約 18.6 年或 19 年之潮位資料進行計算[Pugh, 1987]，以確保涵蓋主要低頻潮汐訊號(如月球交點週期)之完整影響。本研究同樣採用算術平均法計算平均海水面高度，以作為後續分析之基準。

(七) 研究流程圖

本研究流程如圖 3 所示，整合 GNSS-IR 技術及 GNSS 定位技術，即可求得海水面橢球高觀測量，進而由長期觀測量計算平均海水面橢球高。

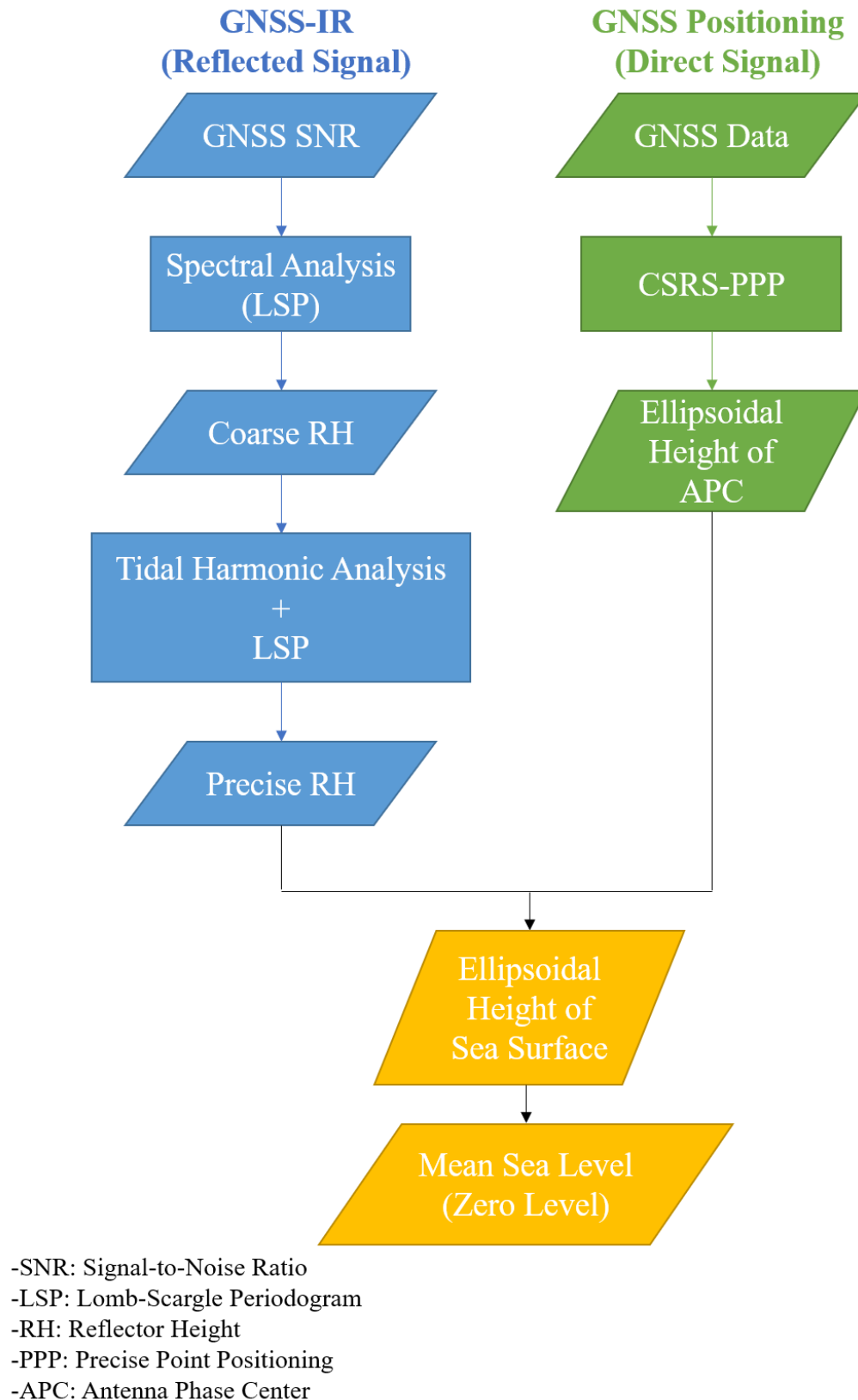


圖 3 GNSS-IR 技術計算平均海水面橢球高流程圖

四、研究成果

(一) GNSS-IR 海水面橢球高成果

本研究利用 GNSS-IR 技術計算 2005/11/01 至 2016/12/31 之高雄海水面橢球高。圖 4 所示為高雄 GNSS 測站於不同方位角及衛星仰角下之第一費涅爾區(First Fresnel Zone, FFZ)，可由此判斷 GNSS SNR 資料衛星仰角之限制，而方位角限制則依據測站周圍環境所定。高雄 GNSS-IR 海水面計算選用之方位角為 40 度至 200 度，衛星仰角為 5 度至 15 度。

計算海水面橢球高前須先求得(1)GNSS 天線相位中心橢球高及(2)反射面高度。GNSS 天線相位中心橢球高成果如圖 5 所示。本研究使用 CSRS 線上 PPP 系統計算高雄 GNSS 站每日天線橢球高，由圖中可發現於 2014 年附近有一明顯跳動(已確認非儀器更動造成)，故額外擬合一步階函數(Step Function)進行改正，並計算得地表垂直運動速率為 -2.9 ± 0.04 mm/yr，此速率後續將用於潮位站資料改正。

反射面至天線相位中心之距離則透過 GNSS-IR 技術求得(高雄站經驗距離約為 5.34 m)，進行誤差改正(海水面動態改正、對流層延遲改正及頻間偏差改正)、及天線相位中心(Antenna Phase Center, APC)至天線參考中心(Antenna Reference Center, ARC)距離改正及後可得反射面至天線參考中心之距離，後續透過 GNSS 天線相位中心橢球高扣除反射面高度即可獲得海水面橢球高。圖 6 所示為高雄站 GNSS-IR 海水面橢球高之時間序列，透過調和分析擬合 37 個分潮可進行 GNSS-IR 粗差偵測，擬合之標準偏差(Standard deviation, STD)為 14.9 cm。

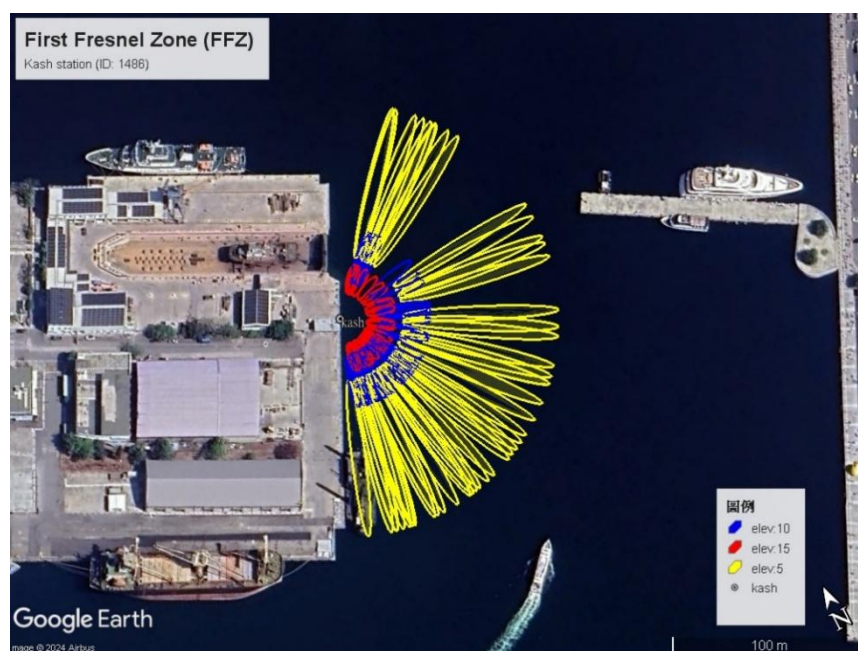


圖 4 高雄 GNSS 測站於不同衛星仰角之第一費涅爾區(FFZ)示意圖(以 GPS-L1 為例)。(黃色橢圓)衛星仰角 5 度；(藍色橢圓)衛星仰角 10 度；(紅色橢圓)衛星仰角 15 度；(黑色圓圈)GNSS 測站。

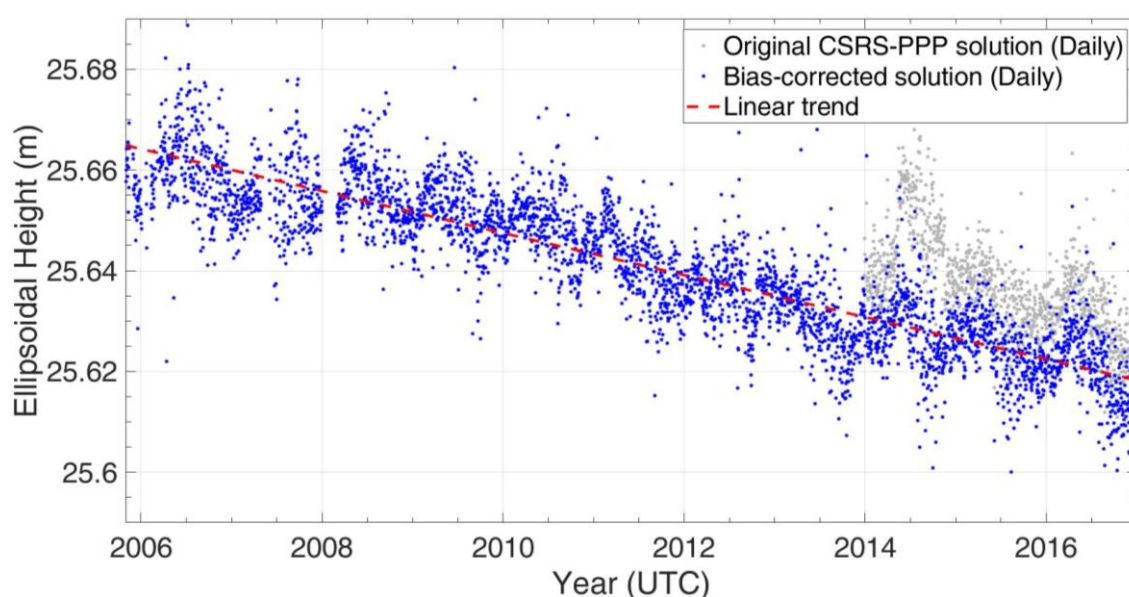


圖 5 高雄 GNSS 天線橢球高時間序列。(灰點)原始 CSRS-PPP 系每日定位解；(藍點)改正 Bias 後之 CSRS-PPP 每日定位解(紅虛線)改正後 CSRS-PPP 成果計算得之地表垂直運動速率。

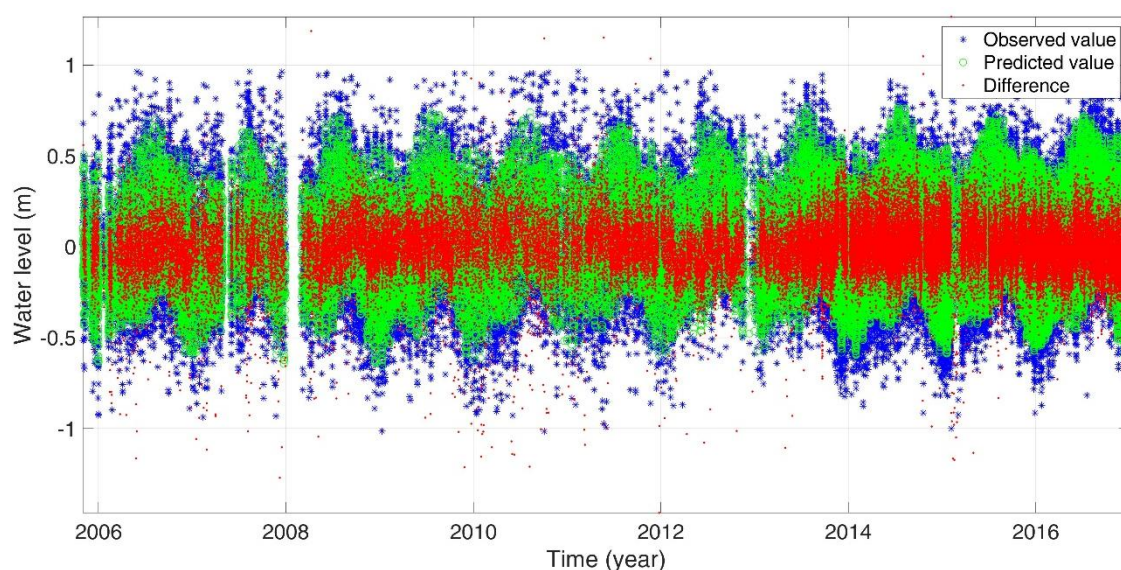


圖 6 高雄海水面橢球高成果(移除平均值)。(藍點)GNSS-IR 海水面變化；(綠點)調和分析擬合 37 個天文分潮之海水位變化；(紅點)GNSS-IR 與調和分析擬合成果之差值。

(二) 平均海水面橢球高計算成果

本研究採用算術平均法估算高雄站 GNSS-IR 平均海水面橢球高，並將計算結果與共站潮位站進行比較。由於潮位站原始數據係基於 TWVD2001 高程系統，故須先將潮位轉換至橢球高基準下，以確保兩者具有一致之參考面。表 2 所列為不同大地起伏模型之大地起伏值與實測大地起伏(由實測橢球高扣除實測正高所得)之比

較成果。除 EGM2008 模型之差異較大外，其餘模型與實測值均相近，最大差值為 6 cm(20.300 m－20.240 m)。因此，本研究採用實測大地起伏值(20.240 m)將潮位站正高潮位轉換至橢球高潮位，並進行地表垂直運動改正，以提升資料一致性。

圖 7 所示為 GNSS-IR 與潮位站之海水面橢球高時間序列(為便於與差值同步呈現，已移除各時間序列之海水面橢球高平均值)。由兩者差值(GNSS-IR-TG)可觀察到，GNSS-IR 所推估之海水面橢球高整體上低於潮位站觀測，其差值平均為-12.7 cm，顯示兩者之間存在系統性基準偏差。此偏差可能源自於垂直方向之系統性平移相關，例如幾何大地起伏值誤差、天線高度設定、設備安裝誤差、潮位站零點率定或潮位站參考水準重新埋設等[內政部國土測繪中心，2016]等此外，該偏差亦可能與 GNSS-IR 反演過程中未考慮海況偏差(Sea State Bias, SSB)有關；海況偏差係指海面粗糙度、波浪高度及波浪形態等海況條件改變時，反射訊號有效散射中心(effective scattering center)相對於平均海面的系統性偏移現象(通常來自波谷反射；波峰訊號較易產生散射)，因此可能低估海水面高度。故後續研究仍須進一步探討各種因素對於 GNSS-IR 海水面橢球高之影響。就統計參數方面，本研究差值之標準偏差(STD)為 13.4 cm，與既有研究於高雄站之成果相當一致[*Lee et al.*, 2019]。此外，由於潮位站資料之時間解析度為每 6 分鐘一筆，而 GNSS-IR 通常需至少 10-20 分鐘(因取樣頻率而異)才有穩定的海水面解，且於高低潮位時不一定有海水面觀測，故與潮位站資料有較大偏差。儘管如此，兩者之相關係數(Correlation coefficient)仍達 0.87，顯示 GNSS-IR 能有效捕捉海水面變化之整體趨勢。值得注意的是，當潮位資料出現缺測時，差值序列(圖中黑點)呈現明顯偏移，反映 GNSS-IR 在時間連續性與基準穩定性方面具有一定優勢。

進一步而言，本研究以 2017.0(即 2017/1/1)為參考時刻，利用算術平均法估算 GNSS-IR 平均海水面橢球高為 20.348 m，而潮位站對應之海水面橢球高為 20.475 m，兩者差值為-12.7 cm，與時間序列分析結果一致。未來可進一步引入其他垂直偏移修正項及海況偏差評估，以縮減 GNSS-IR 與潮位站之系統性差異，提升平均海水面橢球高之估算精度。

圖 8 所示為 GNSS-IR 與潮位站觀測之海水面橢球高變化(已移除平均值)之散佈關係。整體而言，資料點高度集中於對角線附近，顯示兩者之間具有極高之一致性。線性迴歸結果(紅線)與理想關係線 $y=x$ (黑虛線)幾乎重合，反映出 GNSS-IR 所反演之海水位與潮位站觀測值在變化趨勢上具有良好對應關係。由定量結果可知，其迴歸斜率為 0.99，接近理想值 1，顯示 GNSS-IR 在振幅尺度上與潮位站觀測結果相當一致，僅呈現輕微低估之情形；同時，其決定係數(Coefficient of determination) R^2 為 0.9999，代表兩者之間具有極強之線性相關性。

綜合而言，雖然 GNSS-IR 與潮位站資料之間仍存在基準面(datum)上的系統性差異，例如參考面定義、垂直地殼運動及儀器安裝條件等因素所導致之偏移，但在移除此類基準差異後，兩者於動態變化上的高度一致性，顯示 GNSS-IR 觀測具備良好之精度與穩定性。因此，GNSS-IR 不僅可作為傳統潮位站觀測之有效補充，在觀測條件受限或潮位資料缺乏之區域，亦具有潛力作為替代海水位監測手段。本研究

結果進一步驗證 GNSS-IR 技術於沿岸海水位監測與高程基準應用上的可行性與發展潛力。

表 2 各模型之大地起伏與實測大地起伏

大地起伏模型	大地起伏值(m)
EGM96	20.300
EGM2008	19.681
2015 MOI 混合法模型	20.287
2021 MOI 混合法模型	20.290
實測大地起伏(橢球高－正高)	20.240

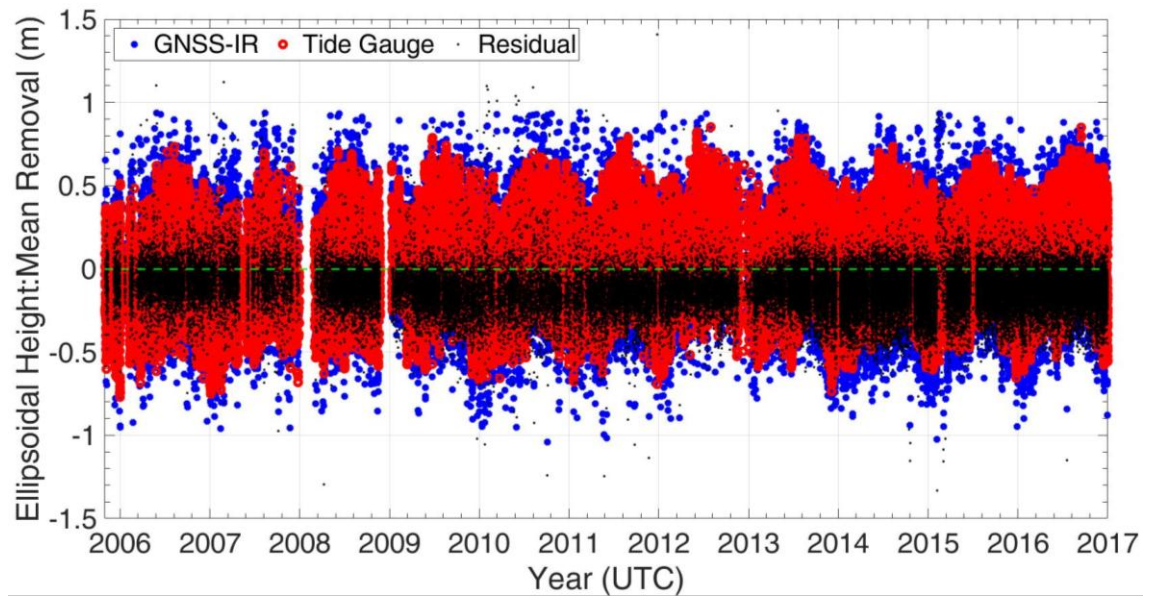


圖 7 GNSS-IR 與潮位站海水面橢球高(移除各自平均)時間序列。(藍點)GNSS-IR 海水面橢球高；(紅點)潮位站海水面橢球高；(黑點)兩者之較差；(綠線)零軸。

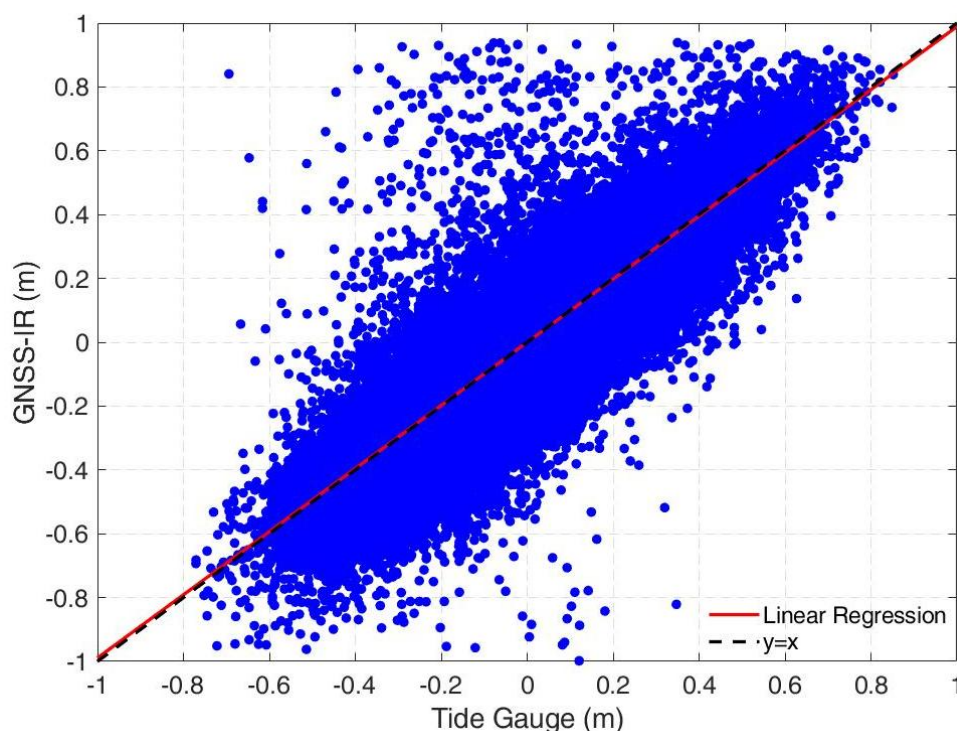


圖 8 GNSS-IR 與潮位站海水面橢球高(移除平均)之散佈圖(Scatter plot)。(紅線)線性迴歸成果；(黑線) $y=x$ 。

五、結論與建議

本研究針對 2005 年 11 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日期間之高雄港 GNSS-IR 與潮位站資料進行海水面橢球高之計算與比較分析。結果顯示，GNSS-IR 所推估之海水面橢球高整體低於潮位站觀測值，兩者之平均差異約為 -12.7 cm ，顯示存在系統性基準偏差。此偏差主要可能來自兩項因素：(1)垂直方向之系統性平移誤差，包括大地起伏值估計誤差、GNSS 天線安裝參數不確定性、潮位站零點率定及潮位站參考水準點重新埋設等因素。(2)海況偏差，由於反射訊號多來自波谷而非波峰，可能導致 GNSS-IR 反演結果低估海水面高度。

綜合本研究結果，顯示利用 GNSS-IR 技術推估長期平均海水面橢球高為一具可行性之方法，特別適用於潮位站觀測稀疏或缺乏之區域。相較於傳統潮位站觀測，GNSS-IR 可直接提供相對於橢球面之海水位變化，較不易受到基準點變動或地表垂直運動之影響，因此在長期海水面變化監測與高程基準建立上具有潛在優勢。另外，在缺乏潮位站、衛星測高近岸觀測品質較差，或需要長期連續監測之海岸地區，GNSS-IR 亦具備輔助律定平均海水面及提供近岸海面高度資訊之潛力與應用價值。然而，此技術亦存在若干限制，例如時間解析度相對較低(約每 10-20 分鐘方可獲得一筆穩定解)，且其觀測精度高度依賴測站周遭環境條件與設置品質。

基於上述結果，建議未來研究可進一步探討各類垂直偏移誤差來源及評估海況偏差改正方法，以提升 GNSS-IR 反演結果之準確性。此外，應針對 GNSS-IR 應用需求建立適合之測站設置規範，包括天線高度、周圍反射環境及觀測遮蔽條件等，

以優化觀測幾何並提升資料品質。

誌 謝

本研究承蒙內政部國土測繪中心「113 年度融合多元感測成果精進臺灣高程基準委託研究採購案(案號：NLSC-113-32)」提供高雄港 GNSS 連續站研究資料與經費支援，使本研究得以順利完成，特此申謝。

參考文獻

- 內政部，2020，我國近岸平均海水面與海潮模式精進工作案第四期成果期末報告。
- 內政部國土測繪中心，2016，104 年度「高程基準檢測工作」報告。
- 史天元，2022，水平、平面、平均海水[位]：論幾個與基準相關譯名。《地籍測量》，第 41 卷，第 2 期，頁 1-13。
- 劉啟清，1998，台灣地區驗潮站長期監測資料之計算及高程基準網之建立工作。
- Banville, S., E. Hassen, P. Lamothe, J. Farinaccio, B. Donahue, Y. Mireault, ... & O. Kamali, 2021, Enabling ambiguity resolution in CSRS-PPP, *Navigation*, 68(2), pp. 433-451.
- Benton, C. J., & C. N. Mitchell, 2011, Isolating the multipath component in GNSS signal-to-noise data and locating reflecting objects. *Radio Science*, 46(06), pp. 1-11.
- Bennett, G. G., 1982, The calculation of astronomical refraction in marine navigation, *The Journal of Navigation*, 35(2), pp. 55-259.
- Bilich, A., & K. M. Larson, 2007, Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR), *Radio Science*, 42(06), pp. 1-16.
- Bilich, A., K. M. Larson, & P. Axelrad, 2008, Modeling GPS phase multipath with SNR: Case study from the Salar de Uyuni, Boliva, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B4).
- Chang, E. T., B. F. Chao, C. C. Chiang, & C. Hwang, 2012, Vertical crustal motion of active plate convergence in Taiwan derived from tide gauge, altimetry, and GPS data, *Tectonophysics*, 578, pp. 98-106.
- El Shouny, A., & Y. Miky, 2019, Accuracy assessment of relative and precise point positioning online GPS processing services, *Journal of Applied Geodesy*, 13(3), pp. 215-227.
- Hofmann-Wellenhof, B., & H. Moritz, 2006, *Physical geodesy*. Vienna: Springer Vienna.
- Lahaye, F., Y. Mireault, P. Héroux, P. Tetreault, & J. Kouba, 2008, Online precise point positioning: A new, timely service from natural resources Canada, *GPSWORLD (Innovation)*, 1, pp. 1-5.
- Larson, K. M., J. S. Löfgren, & R. Haas, 2013a, Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver, *Advances in space research*, 51(8), pp. 1301-1310.
- Larson, K. M., R. D. Ray, F. G. Nievinski, & J. T. Freymueller, 2013b, The accidental tide

- gauge: A GPS reflection case study from Kachemak Bay, Alaska. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(5), pp. 1200-1204.
- Lee, C. M., C. Y. Kuo, J. Sun, T. P. Tseng, K. H. Chen, W. H. Lan, ... & Y. Jia, 2019, Evaluation and improvement of coastal GNSS reflectometry sea level variations from existing GNSS stations in Taiwan, *Advances in space research*, 63(3), pp. 1280-1288.
- Löfgren, J. S., R. Haas, & H. G. Scherneck, 2014, Sea level time series and ocean tide analysis from multipath signals at five GPS sites in different parts of the world, *Journal of Geodynamics*, 80, pp. 66-80.
- Lomb, N. R., 1976, Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and space science*, 39(2), pp. 447-462.
- Peng, D., L. Feng, K. M. Larson, & E. M. Hill, 2021, Measuring coastal absolute sea-level changes using GNSS interferometric reflectometry, *Remote Sensing*, 13(21), 4319.
- Press, W. H., 1992, *The art of scientific computing*. Cambridge university press.
- Pugh, D., 1987, *Tides, Surges, and Mean Sea Level*, John Wiley.
- Scargle, J. D., 1982, Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *The Astrophysical Journal*, 263, pp. 835-853.
- Schwartz, M., 2006, *Encyclopedia of Coastal Science*. Springer Science & Business Media.
- Tétreault, P., J. Kouba, P. Héroux, & P. Legree, 2005, CSRS-PPP: an internet service for GPS user access to the Canadian Spatial Reference Frame, *Geomatica*, 59(1), pp. 17-28.
- Wang, X. L., X. F. He, M. F. Song, S. Chen, & Z. J. Niu, 2022, Analysis of inter-frequency bias in multi-mode multi-frequency GNSS-IR water level retrieval and correction method, *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(11), 2328.

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：

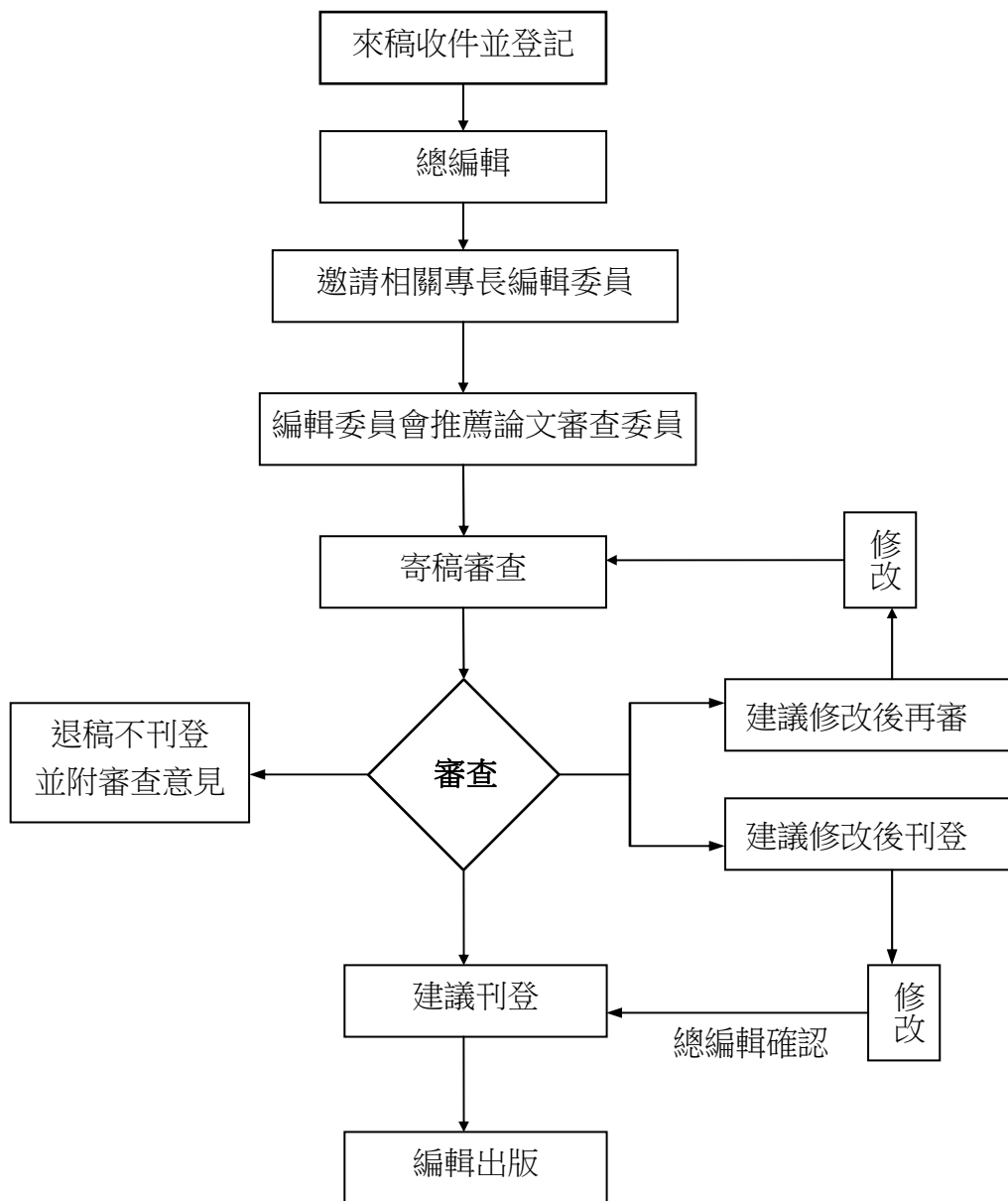
1. 刊登。
2. 修改後刊登(應列明審查意見及建議事項)。
3. 修改後再審(應列明審查意見及建議事項)。
4. 不適刊登(應列明審查意見)。

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

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。

國土測繪與空間資訊期刊

TAIWAN JOURNAL OF GEOINFORMATICS

編輯委員會

主任委員 周天穎 逢甲大學土地管理學系

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

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 國立成功大學測量及空間資訊學系

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

第十四卷第二期

民國一一五年七月

Vol. 14, No. 2

July 2026

目 錄

CONTENTS

大地基準與框架之國際發展

史天元、楊名、郭重言、李啓民、吳俊毅、鄧淳中 103

International Developments in Geodetic Datums and Frames

Tian-Yuan Shih , Ming Yang , Chong-Yen Kuo , Chi-Ming Lee , Chun-Yi Wu , Chun-Chung Teng

高程基準與高程系統研析與建議

郭重言、李啓民、史天元、楊名、吳俊毅、鄧淳中 125

Review and Recommendations for Vertical Datums and Height Systems

Chung-Yen Kuo , Chi-Ming Lee , Tian-Yuan Shih , Ming Yang , Chun-Yi Wu , Chun-Chung Teng

臺灣大地基準雙框架策略：構想與初步成果

楊名、史天元、陳國華、許懷謙、李依璇、蔡秉翰、蕭世民、陳鶴欽、梁旭文 141

The dual-frame strategy for Taiwan Geodetic Datum: conceptualization and preliminary results

Ming Yang , Tian-Yuan Shih , Kwo-Hwa Chen , Huai-Chien Hsu , Yi-Hsuan Lee , Bing-Han Tsai , Shih-Min Hsiao , He-Chin Chen , Hsu-Wen Liang

臺灣大地起伏模型之發展與 2025 年現況

黃金維 161

Development and 2025 Status of Taiwan Geoid Models

Cheinway Hwang

利用全球導航衛星系統干涉反射技術建立臺灣高程基準之可行性評估

李啓民、郭重言、藍文浩、陳鶴欽、康寧凱 187

The Feasibility Assessment of Defining Taiwan's Vertical Datum using GNSS-IR Technique

Chi-Ming Lee , Chung-Yen Kuo , Wen-Hau Lan , He-Chin Chen , Ning-Kai Kang