

利用 SLR 及 GPS 觀測資料估計地心運動之研究

甯方璽* 曾義傑

國立政治大學地政學系

摘 要

地心運動是地球質量的重新分佈和變形，而導致的固態地球形狀中心 (Center of Figure, CF) 與地球質量中心 (Center of Mass of the Earth System, CM) 之間的偏移量。隨著空間大地測量之精度的提高和應用的要求，地心運動研究和估計之重要性與日俱增。目前地心運動皆以單一觀測技術進行求解，本研究將結合 SLR (Satellite Laser Ranging) 及 GPS 觀測資料，評估結合不同觀測數據是否可提升地心運動之精度。本研究使用 2007 年至 2016 年間國際 GNSS 服務 (International GNSS Service, IGS) 之 GPS 觀測資料及部分測站之 SLR 追蹤 GRACE-A 衛星觀測資料，以 GAMIT/GLOBK 和 Bernese 軟體進行觀測站坐標計算，再應用 Helmert 坐標轉換求取地心運動量，並利用含有線性項和球諧項之函數進行資料擬合。成果顯示研究期間內地心運動於 X, Y 和 Z 分量之振幅分別為 2.6 ± 0.2 毫米， 4.1 ± 0.2 毫米和 5.6 ± 0.3 毫米。其年相位於 X, Y 和 Z 分量分別為 72° , 330° 和 145° ，與僅用一種觀測技術求解之精度比較有顯著之提升。

關鍵詞：地心運動，全球導航衛星系統，衛星雷射測距

The Study of Using SLR and GPS Observation Data to Estimate Geocenter Motion

Fang-Shii Ning* and Yih-Jack Cheng

Department of Land Economics, National Chengchi University

ABSTRACT

Geocenter motion describes the difference of Center of Figure (CF) respect to Center of Mass of the Earth system (CM) due to the mass re-distribution and deformation of the Earth system. This is a factor that cannot be ignored in the maintenance of the high-precision terrestrial reference frame. As precision requirements and application demands in space geodesy increase, research on estimation of the geocenter motion become increasingly important as the key point to realize a reference frame with its origin fixed to the center of mass of the Earth system. In this study, GPS observation data from International GNSS Service (IGS) and Satellite Laser Ranging (SLR) tracking data in the period of 2007 to 2016 are applied to estimate the coordinates of IGS sites on Earth's surface by using the GAMIT/GLOBK and Bernese software. Then, the Helmert transformation model is used to get the parameters. Afterwards, the geocenter motion time series are applied with the linear fitting method in order to obtain the amplitudes and phases along three axes of geocenter motion. The annual amplitude of X-, Y-, and Z- components in 9 years' period are 2.6 ± 0.2 mm, 4.1 ± 0.2 mm, and 5.6 ± 0.3 mm respectively. The annual phase of X-, Y-, and Z- components are 72° , 330° , and 145° respectively. This study is significant improvement comparing to just using GPS or SLR technique only.

Keywords : Geocenter motion, Global Navigation Satellite System, Satellite Laser Ranging

一、前言

地球質量中心 (Center of Mass of the Earth System, CM) 是整個地球質量 (包括海洋、大氣及水體) 的中心, 常用於描述慣性空間中的地球運動情形以及作為人造衛星軌道的中心。因為地球表面及各圈層之質量重新分配 (re-distribution) 和變形 (deformation), 包括水循環過程導致地表之質量變化, 如海洋、大氣、陸上水體、冰川等之間的質量交換, 導致由岩石組成之固態地球的原點 (Center of Mass of the Solid Earth, CE) 無法和地球質量中心重合。而利用特定空間大地測量技術所測得之國際地球參考框架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF), 其透過結合多種空間大地測量工具之觀測量所建立 ITRF 下的地球形狀中心 (Center of Figure, CF), 與 CE 差異小, 相差不超過百分之二, 影響量介於次毫米至 1 毫米, 可取代之。因此, 本研究將 CF 相對於 CM 之變動量定義為地心運動 (Geocenter Motion), 如圖 1 所示 [1,2,3]。

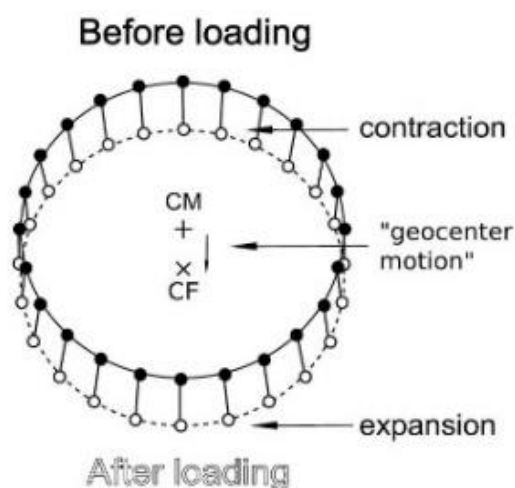


圖 1. 地心運動示意圖(改繪自 [4])

ITRF 透過結合多種空間大地測量工具之觀測量所建立, 除少數不連續的情況外, 地表觀測點位皆假設為線性移動, 理論上 ITRF 坐標原點定義在某時間之 CM 上, 而非近瞬時之 CM。實際上, 受到地表觀測點位非全球性均勻分佈之情況下, 地球 CF 與 ITRF 框架原點間存在一偏差

量。地心位置每年變動約數個釐米, 造成 ITRF 坐標框架原點與原先定義之原點產生偏離, 若忽略此偏離量, 地面點位定位及人造衛星定軌之精度將因為地心運動而產生誤差。透過日趨成熟的大地測量工具, 可了解地球質心運動的量級和規律, 以便有效削弱或消除其對精密定位或定軌的影響。

地心運動可以透過兩種檢測方式求得, 分別為利用描述重力位之一階項係數之變化量推算, 與利用地面觀測站坐標之變化間接求得 [5]。在五種用於建構 ITRF 框架的空間大地測量技術中, 除超長基線干涉術 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 和雷射測月技術 (Lunar Laser Ranging, LLR) 外, 衛星雷射測距 (Satellite Laser Ranging, SLR)、全定位系統 (Global Positioning System, GPS) 和多里斯系統 (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite, DORIS) 衛星均圍繞地心質量中心 CM, 由上述三種技術得到之觀測資料可直接應用於地心運動的解算 [6]。根據文獻指出 SLR 觀測技術目前被認為最適合應用於監測地心運動 [6,7]。另外, GPS 隨著衛星軌道力學模型和資料處理方式的完善, 正在越來越廣泛應用於地心運動的研究中 [2,7,8]。

據此本研究將結合 SLR 及 GPS 觀測量, 針對網形偏移法 (Network shift method) 探討長期之地心運動時間序列, 並比較其與單一觀測方法之精度。

SLR 系統因為其衛星結構簡單, 觀測精度高, 對地心運動敏感。然而, SLR 地面測站因為點位稀少、分佈不均且海洋區域無法設立測站等因素, 影響最終的估計成果 [5,9,10]。因為 SLR 測站分佈的不均, 而導致的相位誤差會在次月等級, 更會對 X 軸和 Z 軸方向的地心運動振幅造成 1mm 的直接影響 [3]。

另一方面, GPS 系統的測站分佈雖然相對密集且分佈均勻, 滿足求解地心運動之首要條件, 但其天線相位中心及所受的光壓和大氣壓力模型等因素尚未完全完善, 其應用於地心運動之精度還有提升之空間 [2,11,12]。

目前, 地心運動的研究方向, 主要為聯合建構 ITRF 框架的五種空間大地測量技術, 充分利用其各自的優點, 以利地心運動的精確和穩定求解。但由於 VLBI 系統不受軌道力學的約束和極少應用於地心運動之研究中 [7,

12,13]、DORIS 的系統誤差嚴重和模型尚未精確等因素 [14]，上述二者目前尚不適合用於研究地心運動。

由於人造衛星受到軌道力學的約束圍繞著地球質量中心 CM 在軌道上運行，而地面觀測站則位於固態地球表面，因而透過衛星觀測資料(如 SLR、DORIS 和 GPS 資料)的傳輸及處理，可以得出地球質心 CM 相對於固態地球形狀中心 CF 的運動量 [6,10]。

另外，針對網形偏移法之研究方法，前人文獻對進行空間大地測量工具之資料合併較少著墨，僅使用一種觀測量進行地心運動之研究，如 Lavallée 等人於 2006 年所發表之研究 [4]。但在一階變形法研究方法方面，則有許多衛星軌道與地球物理模型合併的相關論文，如 GRACE 衛星資料結合海洋模型等 [3,15,16]。

綜上所述，為求解高精度且穩定的地心運動，本研究將利用 2007 至 2016 年間利用 SLR 測距技術對 GRACE-A 衛星進行觀測的地面測站觀測資料，和遍布於世界各地的連續運行參考站 (Continuously Operating Reference Stations, CORS) 的觀測資料，透過觀測量合併解算，再利用網形偏移法求得研究期間的地心變化。

二、研究流程與理論基礎

本研究利用平均分佈於地球表面，從 2007 年至 2016 年間之 SLR 及 GPS 觀測站之測站資料，包含 SLR 之短波脈衝雷射對低軌道衛星 (Low Earth orbit Satellite)(GRACE-A) 進行測距和雙頻 GPS 載波相位觀測量進行長基線的大地測量，透過結合二者之方差-協方差矩陣 (Variance-Covariance Matrix) 合併，將解算成果固定於地球質心 CM 參考框架之下，透過赫爾默特七參數坐標轉換 (Helmert transformation)，求出 CM 框架相對於 ITRF 框架之偏移量，進行地心運動之估計。依照地心運動之時間序列，利用含有線性項和球諧項之函數進行擬合，最後探討地心運動之精度。

2.1 實驗流程

本研究之實驗流程如圖 2 所示，而實驗重點在於合併 GPS 成果解與 SLR 成果解之變方-協變方矩陣，以便後續地心運動時間序列之求解，並透過時間-頻率分析驗證其精度是否適用。依照操作步驟可以分為三個階段：

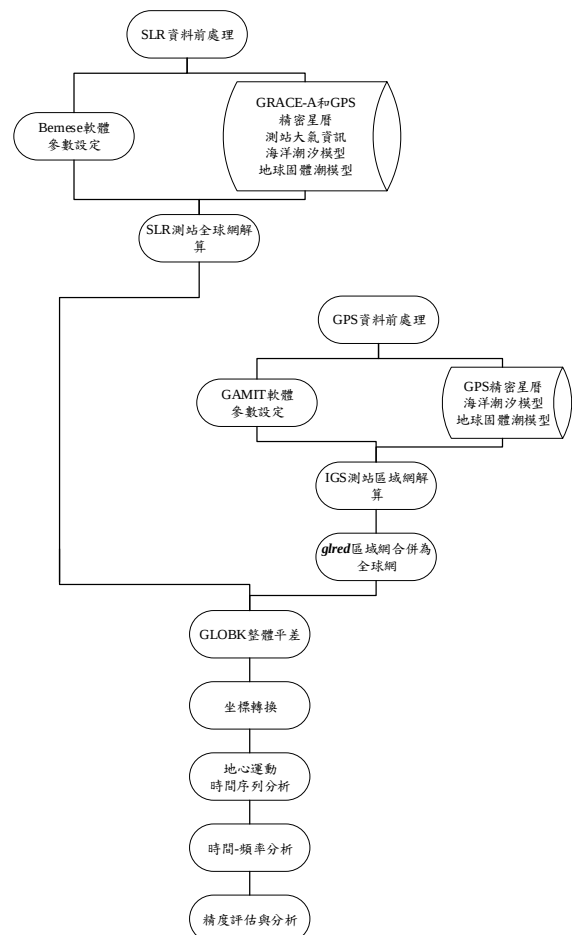


圖 2. 實驗流程圖

2.1.1 SLR 與 GPS 觀測資料前處理

為了得到可以應用於地心運動研究的 SLR 與 GPS 觀測資料，必須先進行 SLR 與 GPS 觀測資料的相關解算。然而為了達到比地心運動量級更小的觀測精度，以便進行地心運動之相關研究，必須考量在解算時諸多系統誤差所帶來之影響。本研究在使用 SLR 觀測資料解算地面測站坐標前，先透過減動力法 (reduced-dynamic method) 求出觀測衛星 GRACE-A 的標準星曆資料。因此需要在事前準備 GRACE-A 之精密星曆、GPS 之精密星曆、海洋潮汐和地球固體潮模型、地球自轉參

數、SLR 測站之天氣資訊和偏心資訊等資料供後續觀測量改正之用。而 SLR 觀測量的處理步驟為預先將資料轉檔，利用減動力法計算 GRACE-A 軌道，利用標準軌道與觀測量，加上各類系統誤差模型予以改正後，反算地面測站坐標並建立法方程式，得到 CM 框架下之每週時變解。

另外，在解算 GPS 觀測資料時，應考量並準備衛星精密星曆、海洋潮汐模型、地球固體潮等模型供後續觀測量改正之用，並且必須將接收儀的型號、天線型號、軟體版本、天線高等接收儀相關參數詳細設定，以避免系統誤差影響定位之精度。而 GPS 觀測量的計算步驟分別為，計算 GPS 雙差觀測量，利用雙頻觀測量組成線性組合以便得以改正電離層延遲誤差，加上各類系統誤差模型改正後，解算區域網的法方程式，將區域網合併為全球網，得到 CM 框架下之每日時變解。

2.1.2 測站坐標求解

為求得觀測站之坐標，主要需要經過兩個步驟。第一步驟為將 GPS 每日解成果以卡爾曼濾波法進行整體平差，以便得到與 SLR 解之相同時間解析度之每週解成果。

第二步驟為每週解的年度合併，將前一步驟的每週解成果，包含 GPS 每週解與 SLR 每週解，透過協變方矩陣以卡爾曼濾波法之方式進行整體平差，以便得到每個參考站之年度解算成果，其中包含觀測站之最後時刻（年積日 365 天）坐標與其標準差、年度之平均坐標與其標準差、參考站之年移動速度與其標準差等資訊。

2.1.3 動時間序列

在經過卡爾曼濾波法進行整體平差以後，可以得到測站於最後時刻的坐標，而依照坐標表示方法可以分為三維直角坐標、經緯度大地坐標和站心地平坐標。其中，以 X 、 Y 和 Z 表示之三維直角坐標系統，較符合本研究之全球性研究範圍，且同時具有三維之空間資訊。故本研究利用三維直角坐標系統，將本研究之解算成果（於 CM 框架之下），與歐洲定軌中心（Center

for Orbit Determination in Europe, CODE) 所公告之 IGS 參考站週解之 CF 框架坐標成果進行 Helmert 坐標轉換，以求得地心運動之時間序列。

2.1.4 建立地心運動模型

經過上述程序，再得到地心運動時間序列以後，即可透過帶有線性和球諧項的擬合式，擬合出地心運動模型。而其輸出之成果以研究時間範圍內的地心運動三軸振幅、相位、趨勢及其標準差為主。

2.2 資料來源及軟體介紹

2.2.1 資料來源

2.2.1.1 GPS 觀測資料來源

本研究使用透過 FTP (File Transfer Protocol) 服務所下載之 IGS (International GNSS service) 所提供之全球均勻分佈的雙頻 GPS 觀測站觀測資料，測站分佈圖如圖 3 所示。為了得到穩定的研究成果，本研究在資料前處理前必須先篩選出合適之研究材料。篩選上述國際 GPS 測站的原因有以下兩點考量：

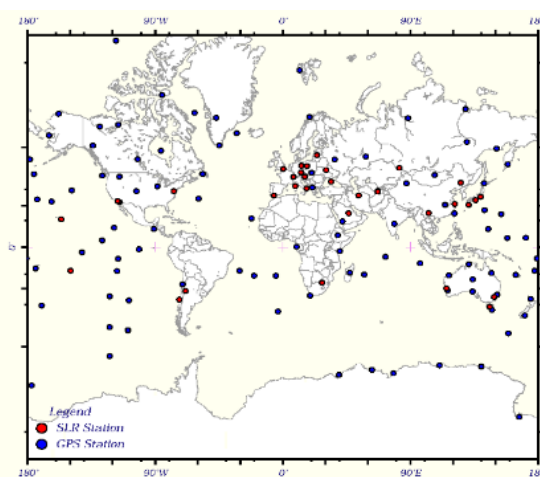


圖 3. GPS 測站及 SLR 測站分佈圖

2.2.1.1.1 資料品質與時間長度

測站必須被設立於穩定且無干擾之環境。透過 IGS 網站，除了能夠加以了解測站之基本資料外，本研究主要考量該測站是否對空通視良好、無障礙物或其他電磁波干擾等基本原

則。除此之外，測站需位於地質相對穩定之區域，板塊運動或地殼運動量級與速度不活躍或具有一致性且無大地震等天然災害影響之地區。例如，日本筑波因為受到 2011 年 311 大地震影響，此後該站（TSKB 站）不適合繼續使用。

另外，測站所接收到的資料時間長度必須涵蓋研究的時間範圍，以確保有一致且穩定的研究成果。

2.2.1.1.2 幾何強度與分佈情況

測站的幾何分佈對於利用人造衛星的研​​究會造成影響，例如 GNSS 測量的幾何分佈將會反應在其最終平差之後的結果。無論是區域網的初步平差或是與 SLR 解之整體平差，各個測站的分佈情況都會影響到研究最終結果，因此必須謹慎考慮整體測網之幾何強度。

另外，根據文獻回顧，在研究地心運動時，測站必須平均分佈於地表之上。因此，本研究將地球劃為多個以經緯度各取 15° 為邊長的網格，共 288 個。並且原則上在每個網格中各取 1 個 IGS 測站，以便維持測站平均分佈。

2.2.1.1.2 SLR 觀測資料來源

本研究使用透過 FTP 服務所下載之美國地殼動力數據中心 (Crustal Dynamics Data Information System, CDDIS) 所提供之 SLR 觀測 GRACE-A 的 normal points data 格式觀測資料。

目前，CDDIS 所提供的衛星雷射測距觀測資料共分成三種，分別為 full-rate data、quick-look data 以及 normal points data。

Full-rate data 格式觀測資料為 SLR 的最原始觀測資料，該數據未經任何處理，為 MERIT(Monitor Earth Rotation and Intercompare the Techniques of observation and analysis) 所發展之觀測資料格式。目前 SLR 技術發展至今，在衛星經過測站上空的短短幾分鐘內，即可觀測到數以千計的觀測資料。但由於儀器、氣象等因素，使得該批資料之間的相關係數變得很高，且如此高密度且原始的數據對於後續使用造成巨大負擔。因此，在 SLR 處理流程中，Full-

rate data 格式觀測資料不常被直接使用，而是先經過資料前處理的程序，因而產生了 Quick-look data 格式觀測資料。

Quick-look data 格式觀測資料為 CSTG (Commission on International Coordination of Space Techniques for Geodesy and Geodynamics) 所發展之觀測資料格式。Quick-look data 格式觀測資料在經過資料前處理程序之後，剔除了原始觀測資料中過於繁複且冗長的內容，只保留檔頭資料和符合時間標準的觀測數據。

為了解決 Full-rate data 資料的高密度和數據龐大的問題，ILRS 將原始觀測資料通過濾波和壓縮的處理程序，以一段距離來表示某一段時間內的平均觀測距離，稱之為 Normal points data 資料。上述之處理流程會偵測並消除原始觀測資料中的錯誤、評估觀測精度以及縮減資料量，使得 Normal points data 資料更適合應用在各項研究與分析中。Normal points data 資料的平均觀測距離的精度被視為雷射測距儀的內部精度，並不包含系統系的影響在內，必須藉由平差模型加以評估 [17]。Normal points data 資料具有下列幾項特性，是本研究使用該資料的主要考量：

1. 保留原始觀測資料的必要資訊；
2. Normal points 之間的殘差相關性已不顯著；
3. 資料中的大錯誤已經剔除。

然而，因為 Normal points 觀測資料於 2012 年開始使用，本研究在計算 2012 年以前之觀測量時，使用 Quick-look 格式之觀測資料。

2.2.2 軟體介紹

本研究主要使用下列兩種研究型軟體：

2.2.2.1 GAMIT/GLOBK 軟體

本研究使用 GAMIT/GLOBK 第 10.6 版本軟體，以便處理雙頻 GPS 觀測資料。

GAMIT/GLOBK 由美國麻省理工學院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT)、加州大學聖地牙哥分校斯克利普斯海洋研究所 (Scripps Institution of Oceanography, SIO) 和哈佛大學史密松天體物理中心 (Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, CfA) 等機構共同研究和開發的研究型 GPS 相對定位

解算軟體，亦是全球定位系統大學聯盟 (University NAVSTAR Consortium, UNAVCO) 所推薦的三套 GPS 解算軟體之一。該軟體主要由 C 語言所撰寫，搭配 Fortran 撰寫部分函式，並主要支援 LINUX、Mac-OS、HP-UX、Solaris、IBM/RISC 和 DEC 等作業系統。

GAMIT 負責處理 GPS 雙差之載波相位觀測量以解算基線；GLOBK 則以卡爾曼濾波法用以處理區域網或國際網的合併、不同空間大地測量技術之間的合併、坐標的整體平差、時間序列分析等等 [18]。GAMIT 及 GLOBK 除了可以解算出測站的坐標及其參數外，更能夠解算人造衛星軌道參數、地球自轉參數、測站對流層延遲參數、電離層改正參數等等 [19]，因此其應用方面也漸漸從大地測量學延伸到地球動力學、衛星動力學及地球物理學等領域。而其可同時處理的最大測站數為 99，作此設定的原因在於提高程式計算的效率，如要進行大於此測站數的運算則必須將測站進行分區分塊，最後可以將區域網透過 GLOBK 進行合併 [19]。以本研究為例，本研究利用 IGS 測站將地球分為八大區 (如圖 4)，分別組成區域網以後，透過每個區域網中的相同測站，利用 GLOBK 當中的 glred 模組進行合併。

而 GAMIT/GLOBK 軟體相較於其他高精度的 GPS 相對定位軟體如 Bernese、GIPSY 等，其特點在於 GAMIT/GLOBK 乃是利用最小二乘法概念估計各項參數後將整體網型一同平差。因此，GAMIT 得到的結果會使得測站間的相關性強，只要網型中存在一個較差的測站資料，即影響整個網型的解算成果。

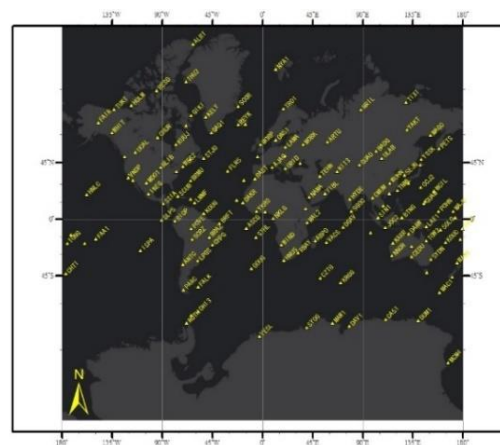


圖 4. IGS 測站分佈圖

2.2.2.2 Bernese 軟體

本研究使用 Bernese 第 5.2 版本軟體，處理 SLR 觀測資料。Bernese 軟體是由瑞士伯恩大學天文研究所 (Institute of Astronomy, University of Bern) 所研究、發展及維護的研究型綜合軟體，亦是 UNAVCO 推薦之三套軟體之一。Bernese 軟體主要由 Fortran 語言撰寫而成，並附有原始程式，使用者可依照需求進行修改或擴充。

Bernese 較其他研究型軟體，其強項有下列幾項 [20]：可以長期全自動處理 GPS 觀測網資料；可針對電離層及對流層延遲效應進行改正，並提供最新模式供使用者選擇；可以模擬 GPS 及 GLONASS 衛星雙頻觀測資料；提供程式原始碼，可進行修改或擴充。因為上述原因，以至於 Bernese 普遍應用在地球動力學、地殼與板塊運動、極運動等方面的計算，且更常使用於大地測量領域中。

Bernese 從 1988 年發展至今，已成為一套綜合型之空間大地測量技術解算軟體。它除了可以單獨處理 GPS 或 GLONASS 的衛星觀測資料，亦可以結合上述兩種衛星資料同時解算。此外，Bernese 亦可以處理 SLR 的觀測資料。因此，本研究利用 Bernese 處理觀測 GRACE-A 的衛星雷射測距觀測資料。

本研究利用平均分佈於地球表面，從 2007 年至 2016 年間之 SLR 及 GPS 觀測站之測站資料，如圖 3 所示，包含 SLR 之短波脈衝雷射對 LEO Satellite (GRACE-A) 進行測距和雙頻 GPS 載波相位觀測量進行長基線的大地測量，透過結合二者之方差-協方差矩陣 (Variance-Covariance Matrix) 合併，將解

算成果固定於地球質心 CM 參考框架之下，透過赫爾默特七參數坐標轉換 (Helmert transformation)，求出 CM 框架相對於 ITRF 框架之偏移量，進行地心運動之估計。依照地心運動之時間序列，利用含有線性項和球諧項之函數進行擬合，最後探討地心運動之精度。

本研究之實驗重點在於合併 GPS 成果解與 SLR 成果解之變方-協變方矩陣，以便後續地心運動時間序列之求解，並透過時間-頻率分析驗證其精度是否適用。依照操作步驟可以分為四個階段：

2.2.2.2.1 SLR 與 GPS 觀測資料前處理

為了得到可以應用於地心運動研究的 SLR 與 GPS 觀測資料，必須先進行 SLR 與 GPS 觀測資料的相關解算。然而為了達到比地心運動量級更小的觀測精度，以便進行地心運動之相關研究，必須考量在解算時諸多系統誤差所帶來之影響。本研究在使用 SLR 觀測資料解算地面測站坐標前，先透過減動力法 (reduced-dynamic method) 求出觀測衛星 GRACE-A 的標準星曆資料。因此需要在事前準備 GRACE-A 之精密星曆、GPS 之精密星曆、海洋潮汐和地球固體潮模型、地球自轉參數、SLR 測站之天氣資訊和偏心資訊等資料供後續觀測量改正之用。而 SLR 觀測量的處理步驟為預先將資料轉檔，利用減動力法計算 GRACE-A 軌道，利用標準軌道與觀測量，加上各類系統誤差模型予以改正後，反算地面測站坐標並建立法方程式，得到 CM 框架下之每週時變解。

另外，在解算 GPS 觀測資料時，應考量並準備衛星精密星曆、海洋潮汐模型、地球固體潮等模型供後續觀測量改正之用，並且必須將接收儀的型號、天線型號、軟體版本、天線高等接收儀相關參數詳細設定，以避免系統誤差影響定位之精度。而 GPS 觀測量的計算步驟分別為：計算 GPS 雙差觀測量，利用雙頻觀測量組成線性組合以便得以改正電離層延遲誤差，加上各類系統誤差模型改正後，解算區域網的法方程式，將區域網合併為全球網，得到 CM 框架下之每日時變解。

2.2.2.2.2 測站坐標求解

為求得觀測站之坐標，主要需要經過兩個步驟。第一步驟為將 GPS 每日解成果以卡爾曼濾波法進行整體平差，以便得到與 SLR 解之相同時間解析度之每週解成果。

第二步驟為每週解的年度合併，將前一步驟的每週解成果，包含 GPS 每週解與 SLR 每週解，透過協變方矩陣以卡爾曼濾波法之方式進行整體平差，以便得到每個參考站之年度解算成果，其中包含觀測站之最後時刻（年積日 365 天）坐標與其標準差、年度之平均坐標與其標準差、參考站之年移動速度與其標準差等資訊。

2.2.2.2.3 建立地心運動時間序列

在經過卡爾曼濾波法進行整體平差以後，可以得到測站站於最後時刻的坐標，而依照坐標表示方法可以分為三維直角坐標、經緯度大地坐標和站心地平坐標。其中，以 X、Y 和 Z 表示之三維直角坐標系統，較符合本研究之全球性研究範圍，且同時具有三維之空間資訊。故本研究利用三維直角坐標系統，將本研究之解算成果（於 CM 框架之下），與 IGS 所公佈之成果（與 ITRF/CF 框架之下）進行 Helmert 坐標轉換，以求得地心運動之時間序列。

2.2.2.2.4 建立地心運動模型

經過上述程序，再得到地心運動時間序列以後，即可透過帶有線性和球諧項的擬合式，擬合出地心運動模型。其輸出之成果以研究時間範圍內的地心運動三軸振幅、相位、趨勢及其標準差為主。

三、成果分析

按前述之研究方法與步驟，利用 GAMIT/GLOBK 進行 GPS 觀測量之處理流程，可以得到兩個主要的解算成果，分別為 GAMIT 區域網每日解和 GLOBK 年度國際網每週解。

而其中的區域每日解成果包含某區域內（本研究將地球以經緯度各取 90° 為邊長，分為八個的區域，如圖 4），IGS 國際參考站

共同解算之基線解。透過每日解的成果報告加以了解該天資料的品質和處理情況，例如週波未定值求解比率，包含寬巷 (Wide Lane, WL) 或窄巷 (Narrow Lane, NL) 週波未定值求解比率、總計採用時刻 (epoch) 數及坐標三軸標準差等資訊。而週波未定值求解比率應該保持在 85% 以上，以保持該結果之可靠程度。倘若發生觀測時段過短造成資料不足，或是該批資料雜訊過多等緣故，可能造成求解比率低於 85% 的情況發生。其中，窄巷求解比率必須高於 80%，影響解算比率高低的因素有觀測時段長短、網型的範圍大小及幾何強度、大氣條件、先驗坐標及衛星軌道參數的準確度等 [21]，在本研究中所有的每日解算成果，寬窄巷週波未定值求解比率皆落在 80% 之上。

為了將結果固定在 CM 框架中，本研究將 GAMIT 區域每日解，利用寬鬆約制的形式，進行最小約制平差 (Minimally constrained least-squares adjustment) 全球每週解的合併。除了確定測站與測站之間的相關性與全球的網形強度以外，更希望地心運動的估計與確定不屬於任何其他特定框架。一旦該約制條件被剔除，GPS 全球每週解將會被固定於 CM 框架之下 [4,22,23]。

而本研究之 CF 框架坐標資料來自於歐洲定軌中心 (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 所公告之 IGS 參考站週解坐標檔，可透過 FTP(<http://ftp.aiub.unibe.ch/BSWUSER52/STA/>) 服務進行下載。

透過七參數轉換，僅用 GPS 觀測量所計算出的地心運動結果如圖 5 所示。由圖 5 可以看出，地心運動在 X 軸和 Y 軸之振幅量級主要保持在正負 10mm 以內。因為測站間基線較長和對流層延遲誤差所影響，對 GPS 高程有相當的影響，導致 Z 軸的精度較差，其精度通常與平面精度相差兩到三倍。本研究的 Z 軸之振幅量級落在正負 20mm 之間。

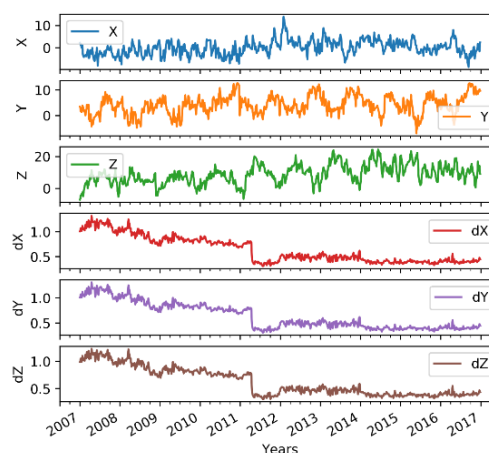


圖 5. 僅用 GPS 觀測量計算地心運動時間序列結果 (單位：毫米)

判斷合併的成果優劣，可以透過合併成果報告中將卡方檢定 (Chi-square test) 值加以了解。卡方檢定值在區域資料上應該要表現出小於 0.5 的值，而在全局尺度的資料時候，再應該要保持在 0.4 至 1.0 之間。如果有一個 h-file (指區域網之變方-協變方矩陣) 存在著較差的 GAMIT 成果或與之前的 h-file 存在著模型不相容的情況，該資料在合併時，會有一個異常的卡方檢定值。當這樣的情況發生時，建議繪製出時間序列圖以檢查導致異常值發生的測站。最常見出現的錯誤通常發生在 GPS 的測站天線高輸入錯誤時，會導致時間序列有不規則的情況發生。然而，本研究之卡方檢定值平均值均保持在 0.4 左右，如圖 6 所示。

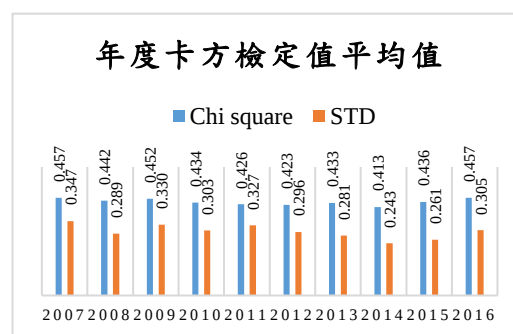


圖 6. 年度卡方檢定值平均值及標準差直線圖

透過七參數轉換，將 SLR 觀測量與 GPS 觀測量所計算出的地心運動結果如圖 7 所示。由圖 7 可以看出，地心運動在 X 軸和 Y 軸之振幅量級主要保持在正負 10mm 以內。因為測站間基線較長和對流層延遲誤差所

影響，對 GPS 高程有相當的影響，導致 Z 軸的精度較差，其精度通常與平面精度相差兩到三倍。本研究的 Z 軸之振幅量級平均落於正負 20mm 之間。

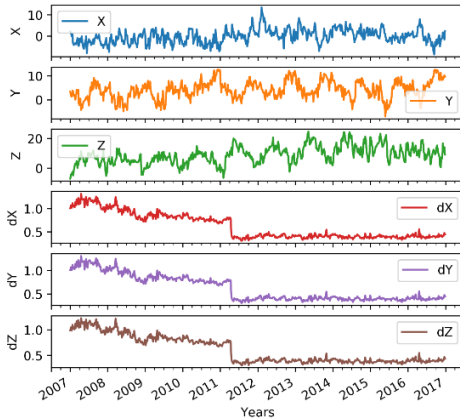


圖 7. SLR 與 GPS 觀測量計算之地心運動時間序列結果(單位：毫米)

在標準差方面，在 2011 年第一季之前，三軸之標準差平均在 1mm 左右。但在 2011 年第一季之後，三軸之平均標準差降到 0.5mm 左右。從歐洲定軌中心所公佈之週解坐標檔所擷取的細節可知，CODE(Center for Orbit Determination in Europe) 在 2011 年第 100 個年積日時，在計算最終坐標時做了一些改變。從圖 8 可知，坐標檔中 Flag A 直線下滑，從平均在 30 到 35 之間的測站數，下降到平均到 25 左右的測站數。而 Flag W 則是直線上升，從平均 25 左右的測站數，上升到平均 45 個測站數。而標籤 A 表示該測站在 IGS 內部進行法方程式合併步驟(normal equation combination step) 時，沒有對該測站進行任何的約制行為；相反地，標籤 W 則是在該步驟時有對測站進行約制。

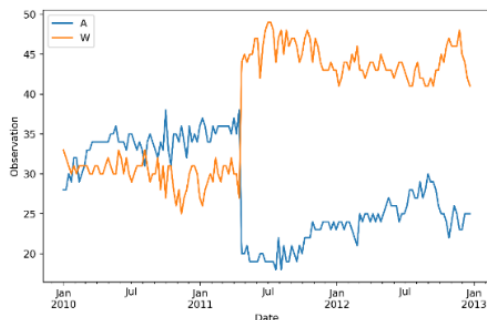


圖 8. CODE 公告坐標檔案中標籤 A 和 W 的個數折線圖

透過上述情形可以了解，因為在約束之測站數 (Flag W) 增加的同一時間，本研究成果之精度明顯提升，這與 Flag W 和 Flag A 的測站數有直接的關係。在本研究所計算之結果不變的情況下，沒有對測站坐標進行約束之測站數 (Flag A) 大於有約束測站坐標之測站數 (Flag W) 時，坐標轉換之精度平均在 1mm 左右；而在對測站坐標進行約束之測站數 (Flag W) 大於沒有約束測站坐標之測站數 (Flag A) 時，坐標轉換之標準差降到 0.5mm 左右。透過上述情形可以了解，本研究所計算的成果與 IGS 所公佈的成果有一致性，因為在約束之測站數 (Flag W) 增加的同時，本研究成果之精度明顯提升。

依照地心運動之時間序列，利用含有線性項和球諧項之函數進行擬合，即可得到地心運動於 X、Y、Z 三軸之振幅、相位、變化趨勢及其誤差，如表 1 所示。表 1 中，振幅以毫米為單位，代表的是在一年內的地心運動最大振幅；相位以度為單位，代表的是最大振幅發生在一年中的年積日 (Day of year)。以本研究之 SLR 和 GPS 合併結果說明，地心運動在 X 軸最大振幅發生在年積日第 72 日，其振幅量為 2.615 毫米。

表 1. 地心運動於 X、Y、Z 三軸之振幅、相位、趨勢及其誤差

	Method [Ⓢ]	GPS [Ⓢ]	SLR [Ⓢ]	SLR + GPS [Ⓢ]
X [Ⓢ]	Amplitude(mm) [Ⓢ]	2.615 [Ⓢ]	2.331 [Ⓢ]	2.615 [Ⓢ]
	σ [Ⓢ]	0.188 [Ⓢ]	5.707 [Ⓢ]	0.186 [Ⓢ]
	Phase([Ⓢ]) [Ⓢ]	75 [Ⓢ]	357 [Ⓢ]	72 [Ⓢ]
	σ [Ⓢ]	10.72 [Ⓢ]	326 [Ⓢ]	10.65 [Ⓢ]
	Trend(mm/yr) [Ⓢ]	0.100 [Ⓢ]	0.330 [Ⓢ]	0.100 [Ⓢ]
	σ [Ⓢ]	0.010 [Ⓢ]	0.380 [Ⓢ]	0.010 [Ⓢ]
Y [Ⓢ]	Amplitude(mm) [Ⓢ]	4.139 [Ⓢ]	6.480 [Ⓢ]	4.172 [Ⓢ]
	σ [Ⓢ]	0.198 [Ⓢ]	5.439 [Ⓢ]	0.188 [Ⓢ]
	Phase([Ⓢ]) [Ⓢ]	338 [Ⓢ]	188 [Ⓢ]	330 [Ⓢ]
	σ [Ⓢ]	11.36 [Ⓢ]	312 [Ⓢ]	10.80 [Ⓢ]
	Trend(mm/yr) [Ⓢ]	0.090 [Ⓢ]	0.690 [Ⓢ]	0.090 [Ⓢ]
	σ [Ⓢ]	0.010 [Ⓢ]	0.370 [Ⓢ]	0.010 [Ⓢ]
Z [Ⓢ]	Amplitude(mm) [Ⓢ]	5.762 [Ⓢ]	1.150 [Ⓢ]	5.683 [Ⓢ]
	σ [Ⓢ]	0.273 [Ⓢ]	5.671 [Ⓢ]	0.273 [Ⓢ]
	Phase([Ⓢ]) [Ⓢ]	150 [Ⓢ]	341 [Ⓢ]	145 [Ⓢ]
	σ [Ⓢ]	10.43 [Ⓢ]	217 [Ⓢ]	10.43 [Ⓢ]
	Trend(mm/yr) [Ⓢ]	0.290 [Ⓢ]	1.210 [Ⓢ]	0.290 [Ⓢ]
	σ [Ⓢ]	0.020 [Ⓢ]	0.380 [Ⓢ]	0.020 [Ⓢ]
Time span [Ⓢ]		2007-2016 [Ⓢ]		

將表 1 所示地心運動資料(GPS + SLR) 進行擬合如圖 9 所示，其中灰色折線為地心運動時間序列，藍色曲線為地心運動模型。透過圖 9 可了解的資訊除了三軸之振幅和相位等資訊，亦可了解地心運動趨勢情形。

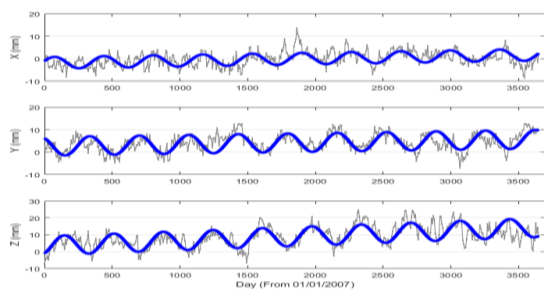


圖 9. GPS+SLR 地心運動成果

另外，為了確保本研究結果之可信程度，本研究將結果與前人之研究成果進行比較。但因為研究方法和研究之時間涵蓋不同，本研究與前人之研究無法在相同條件之下進行比較，如表 2 所示。

表 2. 本研究結果與前人研究成果之比較

Solution	Reference	X				Y				Z				Time span (Year)
		Amp.	d Amp.	Ph.	d Ph.	Amp.	d Amp.	Ph.	d Ph.	Amp.	d Amp.	Ph.	d Ph.	
SLR + GPS	This Study	2.615	0.186	72	11	4.172	0.188	330	11	5.683	0.273	145	10	2007-2016
GPS	This Study	2.615	0.188	75	11	4.139	0.198	338	11	5.762	0.273	150	10	2007-2016
SLR	This Study	2.331	5.707	357	326	6.480	5.439	188	312	1.150	5.671	341	217	2007-2016
SLR + GPS	This Study	2.436	0.224	75	13	4.023	0.198	319	11	6.547	0.396	105	15	2007-2013
GRACE-A (15 PCAs)	Tseng et al., 2016	4.200	0.500	110	24	3.600	0.400	339	20	2.700	0.300	28	9	2005-2013
GPS	Lavallée et al., 2006	2.100	-	39	-	3.200	-	342	-	3.900	-	74	-	1997-2004
GRACE	Kang et al., 2009	3.0		32		2.4		348		4.0		288		2003-2007
GPS	Yu et al., 2017	5.1	0.2	308	4	2.3	0.2	313	9	7.2	0.3	324	5	2000-2010
GPS	Woiseschlä ger, 2014	2.7	0.1	55	3	3.9	0.1	314	2	1.9	0.1	34	1	2003-2014

四、結論

本研究利用平均分佈於地球表面從 2007 年至 2016 年間之 SLR 及 GPS 觀測站之測站資料，包含 SLR 之短波脈衝雷射對低軌道衛星 (Low Earth orbit Satellite)(GRACE-A) 進行測距和雙頻 GPS 載波相位觀測量進行長基線的大地測量，透過結合二者之方差-協方差矩陣 (Variance-Covariance Matrix)，將解算成果固定於地球質心 CM 參考框架之下，透過赫爾默特七參數坐標轉換 (Helmert transformation)，求出 CM 框架相對於 ITRF 框架之偏移量，進行地心運動之估計。依照地心運動之時間序列，利用含有線性項和球諧項之函數進行擬合，最後探討地心運動模型之精度，依實驗之結果或得以下的結論。

1. 本研究成功將 GPS 和 SLR 觀測資料之最終變方-協變方矩陣進行合併，並使用卡方檢定 (Chi-square test) 值加以了解和判斷合併的成果優劣。本研究之卡方檢定值的平均值約落在 0.4 左右，滿足理論上之精度條件。
2. 本研究合併 GPS 與 SLR 測站所解算之地心運動時間序列精度平均值於 X、Y 和 Z 三軸分別約為 0.62mm、0.62mm 和 0.61mm，雖然其地心運動時間序列之精度與僅用 GPS 測站之精度相似，但是，合併 GPS 及 SLR 測站之地心運動時間序列結果較僅用 GPS 測站之結果佳。
3. 經過模型擬合式將時間序列進行擬合之後，地心運動模型成果於 X、Y、Z 分量之振幅分別為 $2.6\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ 、 $4.1\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ 和 $5.6\text{mm} \pm 0.3\text{mm}$ ，其年相位於 X、Y、Z 分量分別為 72° 、 330° 和 145° ，振幅精度保持在 0.3mm 之內，相位則在 11° 以下。
4. 本研究利用十年之資料所計算之趨勢，於 X、Y、Z 三軸趨勢分別為 0.1mm/yr、0.1mm/yr 和 0.3mm/yr。並與目前僅用一種觀測技術求解之精度比較有顯著性之提升。

參考文獻

- [1] Dong, D., Qu, W., Fang, P., & Peng, D. (2014). Non-linearity of geocentre motion and its impact on the origin of the terrestrial reference frame. *Geophysical journal international*, 198(2), 1071-1080.
- [2] Wu, X., Ray, J., & van Dam, T. (2012). Geocenter motion and its geodetic and geophysical implications. *Journal of Geodynamics*, 58, 44-61.
- [3] Collilieux, X., Altamimi, Z., Ray, J., van Dam, T., & Wu, X. (2009). Effect of the satellite laser ranging network distribution on geocenter motion estimation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B4).
- [4] Lavallée, D. A., van Dam, T., Blewitt, G., & Clarke, P. J. (2006). Geocenter motions from GPS: A unified observation model. *Journal of geophysical research: solid earth*, 111(B5).
- [5] Bouille, F., Cazenave, A., Lemoine, J. M., & Crétaux, J. F., 2000, "Geocentre motion from the DORIS space system and laser data to the Lageos satellites: Comparison with surface loading data", *Geophysical Journal International*, 143(1): 71-82.
- [6] Dong, D., Yunck, T., & Heflin, M. (2003). Origin of the international terrestrial reference frame. *Journal of geophysical research: solid earth*, 108(B4).
- [7] Argus, D. F., 2012, "Uncertainty in the velocity between the mass center and surface of Earth", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B10).
- [8] Petrie, E. J., King, M. A., Moore, P., & Lavallée, D. A. (2010). Higher-order ionospheric effects on the GPS reference frame and velocities. *Journal of geophysical research: solid earth*, 115(B3).
- [9] Chen, J. L., Wilson, C. R., Eanes, R. J., & Nerem, R. S. (1999). Geophysical interpretation of observed geocenter variations. *Journal of geophysical research: solid earth*, 104(B2), 2683-2690.
- [10] Crétaux, J. F., Soudarin, L., Davidson, F. J., Gennero, M. C., Bergé-Nguyen, M., & Cazenave, A. (2002). Seasonal and interannual geocenter motion from SLR and DORIS measurements: Comparison with

- surface loading data. *Journal of geophysical research: solid earth*, 107(B12).
- [11] Palamartchouk, K. (2010). Apparent geocenter oscillations in Global Navigation Satellite Systems solutions caused by the ionospheric effect of second order. *Journal of geophysical research: solid earth*, 115(B3).
- [12] Gobinddass, M. L., Willis, P., De Viron, O., Sibthorpe, A., Zelensky, N. P., Ries, J. C., ... & Lemoine, F. G. (2009). Improving DORIS geocenter time series using an empirical rescaling of solar radiation pressure models. *Advances in space research*, 44(11), 1279-1287.
- [13] Kuzin, S. P., Tatevian, S. K., Valeev, S. G., & Fashutdinova, V. A. (2010). Studies of the geocenter motion using 16-years DORIS data. *Advances in space research*, 46(10), 1292-1298.
- [14] Lavallée, D., & Blewitt, G. (2002). Degree-1 Earth deformation from very long baseline interferometry measurements. *Geophysical research letters*, 29(20).
- [15] Rietbroek, R., Fritsche, M., Brunnabend, S.E., et al., 2012. Global surface mass from a new combination of GRACE, modelled OBP and reprocessed GPS data. *J. Geodyn.* 64–71, doi:10.1016/j.jog.2011.02.003.
- [16] Swenson, S., Chambers, D., & Wahr, J. (2008). Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8).
- [17] Seeber, G. (2003). *Satellite geodesy: foundations, methods, and applications*. Walter de gruyter.
- [18] Casula, G. (2015). GPS data processing of five years of more than 300 permanent station database with the distributed sessions approach using GAMIT/GLOBK 10.5 data analysis software in Italian Peninsula.
- [19] Herring, T.A., King, R.W., and McClusky, S.C. (2010). *Introduction to Gamit/Globk.*, Cambridge:MIT Press.
- [20] Beutler, G., Bock, H., Brockmann, E., Dach, R., Fridez, P., Gurtner, W., Hugentobler, U., Johnson, J., Mervart, L., Rothacher, M., Schaer, S., Springer, T., and Weber, R., 2001, “Bernese GPS Software Version 4.2, edited by U. Hugentobler, S. Schaer, and P. Fridez, Astronomical Institute, University of Berne”.
- [21] Herring, T. A., Floyd, M. A., King, R. W., and McClusky, S. C., 2015b, *GAMIT Reference Manual, GPS Analysis at MIT.* , Cambridge:MIT Press.
- [22] Davies, P., and Blewitt, G., 2000, *Methodology for global geodetic time series estimation: A new tool for geodynamics*, *J. Geophys. Res.*, 105(B5), 11,083 – 11,100.
- [23] Heflin, M., Bertiger, W., Blewitt, G., Freedman, A., Hurst, K., Lichten, S., ... & Zumberge, J., 1992, *Global geodesy using GPS without fiducial sites*. *Geophysical Research Letters*, 19(2), 131-134.