

以低成本 GPS 技術進行崩塌潛勢區地表位移監測

徐志磬 1 蕭宇伸 1*

摘要

本研究在阿里山隙頂集水區兩塊崩塌潛勢區內布設低成本之 GPS 單頻接收儀，來進行 GPS 自動化即時監測，以評估此技術應用於地表變位長期監測之可行性。兩塊區域各設置 5 處 GPS 監測站。儀器採用 GPS-721-MRTU 單頻接收儀，每 2 分鐘獲取一筆資料。觀測時間為 2017 年 5 月至 12 月間。本研究之研究重點包括：(1)觀測資料偵測大錯；(2)最佳濾波方式與罩窗寬度之選擇；(3)位移成果計算與展現。研究中也將 GPS 監測站位移結果與利用網路 RTK 技術所測得的結果相互驗證。本研究顯示，GPS 原始資料最佳濾波方法，為利用罩窗寬度 2880 分鐘之高斯濾波處理，然而計算觀測時間內之位移量，其位移達數十公分，與網路 RTK 結果差距甚大，且在南北方向坐標震幅有週期性變化產生。

關鍵字：全球定位系統、地表位移、低成本單頻 GPS 接收儀、網路 RTK。

Surface Displacement Monitoring on Landslide Susceptible Areas by Low-Cost GPS technique

Yu-Shen Hsiao[1] Chih-Cing Hsu[1]

ABSTRACT We use low-cost single-frequency global positioning system (GPS) receivers to monitor long-term surface displacements on the landslide susceptible areas in Xiding catchment area of Alishan. Each area contains five GPS monitoring stations. The used GPS receivers are the types of “GPS-721-MRTU”, and the GPS observations are stored in 2-minute frequency. The GPS observation period is from May to December, 2017. The key points of this study include: (1) the detection of the outliers, (2) the selection for the best filter method and filter width, and (3) the estimate of the surface displacement. All results derived from GPS-721-MRTU are compared with those derived from network RTK technique. This study shows that the best filtering method for GPS raw data is Gaussian filtering with a cover window width of 2880 minutes. However, the surface displacements derived from GPS-721-MRTU reach a few decimeters, which is very different from the network RTK result. The GPS-721-MRTU result also show that the amplitude of the coordinates in the north-south direction is periodically changed.

Keywords : GPS, Surface displacement, low-cost, single-frequency, RTK

[1] 國立中興大學水土保持學系 (不需列職稱)

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan

一、前言

自 921 大地震後，台灣地質更為鬆動，山坡地土砂災害頻傳，因此長期監測大規模崩塌潛勢地區地表滑動有其必要性，而全球定位系統(Global Positioning System, GPS)技術已廣泛被應用於地表滑動監測，例如 Squarzone et al (2005)於法國阿爾卑斯山以單頻 GPS 進行滑坡監測，研究中指出應用 GPS 作地滑地地表變位長期監測具有可行性，且可達到公厘等級之精度。而國內亦有饒正等人(2008)於嘉義縣阿里山鄉進行一機多天線 GPS 自動化即時監測，以瞭解阿里山公路邊坡受震後的災害狀況與地滑特性，並指出阿里山公路段第四彎於颱風降雨過後，地表每六天的最大移動速度為 2.5 公分，且每月的總位移量高達為 10 公分。饒瑞鈞等人(2018)也選擇廬山、清境及萬山等三個潛在深層崩塌地，以單頻 GPS 進行崩塌面位移監測，藉由分析 GPS 資料了解潛在崩塌地之滑移範圍與可能發生崩塌的機制作用。以上文獻皆能達到公分等級之精度，然而要達到高精度結果所使用之儀器價格昂貴，於監測區域內可架設站數和分佈受預算限制，一機多天線 GPS 監測方式雖然可以減少大量成本，但因多個天線共用一台接收儀，有接收儀發生故障則其相關測點皆受到影響之風險。故本研究嘗試以最基本款低成本單頻接收儀(GPS-721-MRTU 型號)佈設數個監測站於隙頂集水區，以評估此儀器監測地表變位之可行性。

行政院農業委員會水土保持局南投分局於 2017 年之「隙頂集水區(嘉義縣-阿里山鄉-D007 大規模崩塌地區)設施調查及土砂災害風險評估與策略因應」計畫報告書中，提出綜合考慮電力來源問題、崩塌地地形現狀與規模、地表破壞跡象和保全對象等原因，於阿里

山隙頂集水區區域內選定兩塊崩塌潛勢區，分別為番路鄉公田村巔頭聚落(以下皆稱巔頭地區)、嘉義縣-阿里山鄉-D007(以下皆稱樂野地區)，嘗試使用低成本之 GPS 單頻接收儀進行 GPS 自動化即時監測，同時提高站數使監測站能廣泛分佈於監測區域。本研究蒐集此計畫之 GPS 觀測資料，來進行位移計算與坐標變化等相關分析。期望本研究有助於災害風險預警與後續之治理對策研擬，進而降低土砂災害發生，保護居民生命財產安全。

二、研究方法

本文研究流程如圖 1 所示，GPS 原始資料取得後，首先經過自行發展之 Fortran 程式及免費軟體 Generic Mapping Tools(GMT)(Wessel et al, 2013) 先進行資料處理而得初步資料。處理之方法包括(1)將 WGS84 坐標轉換為 TWD97 二度分帶坐標；(2)使用內插法方式補齊缺失資料；(3)剔除三倍中誤差之外的極值。由於研究中無法取得 GPS-721-MRTU 接收儀之原始 Rinex 數據格式，故無法配合星曆資料以改正衛星軌道與大氣等誤差。然而衛星軌道與大氣誤差乃 GPS 觀測之主要誤差來源，為進一步減少此誤差，本文嘗試運用濾波方式去除以提高觀測精度。濾波方法中考慮了高斯濾波法(Gaussian filter)與平均值濾波法(Average filter)，並針對適當濾波罩窗寬度進行選擇。本研究也將現地 GPS 監測站之監測成果與採用較高精度之網路 RTK 監測結果，相互驗證比較，並探討其他相關成果包括：(1)分析雨量與位移之關係(2)分析各測站間之相關性(3) GPS 相對誤差。

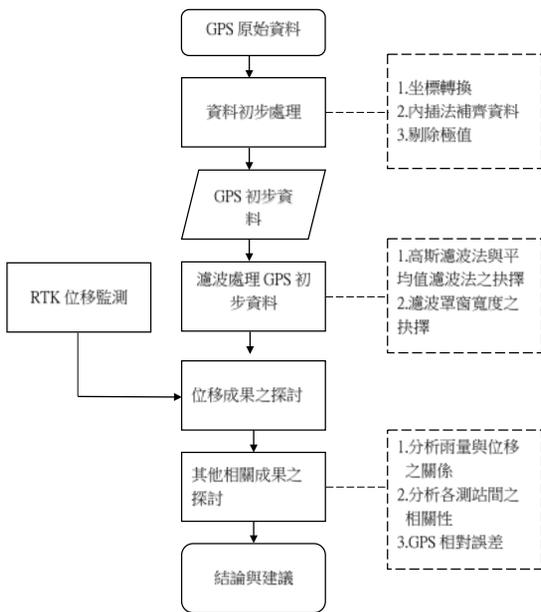


圖 1 研究流程圖。

Figure 1 The flowchart of this study.

2.1. 全球定位系統定位原理

GPS 定位原理為距離測量，利用觀測衛星至地面接收站間的距離，採用距離交會的方式來定出地面接收站的位置，定位時通常需要四顆衛星以上同時觀測。GPS 衛星提供了兩種型態觀測量：其一為虛擬距離 (Pseudo range)，主要供導航定位用；另一為載波相位 (Carrier Phase)，供較精密的大地量測使用(楊名，2007)。虛擬距離與載波相位觀測量分述如下：

(一) 虛擬距離觀測量

GPS 衛星與地面接收儀皆各自產生一組已定義的二位元電碼訊號 (民用之 C/A 碼及軍用之 P 碼)，由衛星發射到地面，地面接收儀同一時間收到 GPS 衛星訊號，將兩者的二元碼比對，並找出相關係數最大值所對應的時間延遲量，此延遲量即是訊號由衛星傳到地面的時間，再乘上光速就可得到衛星到地面接收站的

距離，其第 k 顆衛星與第 i 個地面站觀測方程式表示如下(Seeber, 2003)：

$$P_i^k = c \times \tau \quad (1)$$

其中 P_i^k ：虛擬距離觀測量。

c ：光速。

τ ：時間延遲量。

(二) 載波相位觀測量

由於衛星與接收儀之間有相對運動存在，因此衛星訊號之頻率會受到都卜勒效應 (Doppler effect) 之影響而改變，然而衛星訊號之相位卻不會受到都卜勒效應之影響，故載波相位觀測量的量測方式，是藉由量測自衛星到接收儀接收到訊號之載波訊號相位差而得。假設 T 時刻衛星傳送的載波相位為 $L_s(T)$ ，而 t 時刻到達地面接收器的相位為 $L_r(t)$ ，觀測方程式如下(Seeber, 2003)：

$$L(T) = L_s(T) - L_r(t) \quad (2)$$

2.2. 網路 RTK 原理

即時動態定位技術 (Real Time Kinematic, RTK) 係利用一基準站進行 GNSS 載波相位之量測並將量測量或修正量藉由無線通訊設備傳送至移動站，若基準站與移動站二站彼此相近，一般若在 10 公里以內，則衛星時鐘、衛星軌道、對流層與電離層之誤差亦相近，在週波未脫落的情況下，可藉由一次差分或二次差分消除上述誤差，即可解出整數週波未定值及相對之基線向量。如果要取得移動站之絕對坐標，則僅需要取得基準站之絕對坐標在加上基線向量即可。傳統 RTK 技術一般可取得公分等級之精度但其限制為基準站與移動站之距離一般不得超過 10 至 20 公里，因為距離過長所連帶之誤差影響會造成整數未定值解算與收斂之困難(莊智清，2012)。

網路 RTK 系統採用多個衛星定位基準站所組成的 GNSS 網絡來評估衛星定位基準站涵蓋地區的 GPS 定位誤差，並配合最鄰近的實體基準站觀測資料，建構一個虛擬基準站 (Virtual Base Station, VBS) 做為 RTK 主站使用，此時該虛擬基準站的觀測數據將會與移動站衛星定位接收儀實際接收的觀測數據及誤差模型具有極高的相關性，當再進行 RTK 差分計算處理後，系統誤差即可徹底消除，達到快速、方便、高精度及高可靠度的定位成果 (內政部國土測繪中心，2007)。整體而言，若使用網路 RTK 技術在進行定位測量時，不需自行架設參考站，且於網域範圍內其精度、可靠度及有效性可全面涵蓋，只要藉由網際網路設備與國土測繪中心連結，取得相關觀測量及改正數，即可求得定位坐標 (崔國強等，2006)。

2.3. 濾波原理

本研究考慮兩種濾波方法來處理資料，將分述如下：

1. 高斯濾波

高斯濾波 (Gaussian filter) 是一種線性平滑濾波，適用於消除雜訊，廣泛應用於圖像、龐大資料的處理。於 GPS 資料處理中，高斯濾波則對整串資料序列進行加權平均，每一個資料的值，都由其本身和鄰域內的其他值經過加權平均後得到。高斯濾波屬於低通濾波 (low-pass filter)，假設點資料 (x_i, y_i) , $i=1, \dots, n$, x_i 為資料序列， y_i 為坐標值，則濾波方程式如下 (施豆昶，2010)：

$$\hat{y}_k = \left[\sum_{i=i_{\min}}^{i=i_{\max}} (w_{k,i} \times y(i)) \right] / \sum_{i=i_{\min}}^{i=i_{\max}} w_{k,i} \quad (3)$$

式中， \hat{y}_k 為資料序列中第 k 筆資料濾波後的座標值， i_{\max} 與 i_{\min} 為程式中給定的單窗寬度之上下邊界 (單窗寬度)， σ 為單窗寬度的 1/6， $w_{k,i}$ 為單窗寬度內第 i 筆資料序列所占權重值， $w_{k,i} = \exp(-(\text{ds}/\sigma)^2)$ ， $\text{ds} = x(k) - x(i)$ 。

2. 平均值濾波

平均值濾波 (Average filter) 之原理與高斯濾波相似，平均值濾波是對整串資料序列進行局部平均，每筆資料的值都以鄰域內平均值代表之。平均值濾波方程式同高斯濾波，不同處在於參數中的權重值為 $w_{k,i}=1$ 。濾波方程式如下：

$$\hat{y}_k = \left[\sum_{i=i_{\min}}^{i=i_{\max}} y(i) \right] / (i_{\max} - i_{\min}) \quad (4)$$

式中， \hat{y}_k 為第 k 筆資料濾波後的座標值， i_{\max} 與 i_{\min} 為程式中給定的單窗寬度之上下邊界 (單窗寬度)。

2.4. 研究區域與資料蒐集

本文研究區域位於阿里山隙頂集水區區域內之兩塊高崩塌潛勢區 (圖 2)，分別命名為巔頭地區與樂野地區，來進行 GPS 自動化即時監測。兩區各設置 5 處 GPS 監測站，其中測站編號 GPS_11 至 GPS_15 位於巔頭地區；測站編號 GPS_16 至 GPS_20 位於樂野地區，測站位置亦如圖 2 所示。各監測站以低成本單頻接收儀連續 24 小時接收 GPS 訊號，長期監測分析地表水平變位情形，而訊號接收頻率為每兩分鐘一筆，監測時間為 2017 年 5 月至 12 月。此外，為獲取研究區域之高程資訊，本研究利用無人空拍機獲得區域之正射鑲嵌圖並產製數值地表模型，兩區域之地形如圖 3 和圖 4 所示。本研究從各地區 5 個 GPS 監測站中，選取資料相對完整之 3 個 GPS 監測站作為位移成果之探討使用，所選取之 GPS 監測站分布如圖 3 和圖 4 所示。

GPS 監測站所選用之儀器為低成本單頻 GPS 接收儀，型號為 GPS-721-MRTU，外觀如圖 5 所示。本研究中，接收儀透過天線收取定位資訊後，經由 LoRa (Long Range) 無線通訊技

術傳送至國立中興大學水土保持學系研究室之電腦，故可即時得知定位結果。LoRa 無線通訊技術具有實現遠距離傳輸，並且同時兼具低功耗、低成本的優點。GPS-721-MRTU 接收資料格式如圖 6 所示，定位方式採用虛擬距離觀測量，所接收資料頻率為每兩分鐘一筆，所記錄之主要內容為各 GPS 監測站之 WGS84 經緯度坐標值。現地基站設備箱如圖 7 所示，儀器箱內含主機、LoRa 基站、充電控制器、電池、4G 模組、天線，架設電杆或是現場樺柱以支撐，並以市電為電力主要來源。

除了原本 GPS 監測站外，本研究亦利用網路 RTK 技術分別於兩研究地區各選取五個點

位進行數次的現地監測，點位選擇以盡量靠近 GPS 監測站並均勻分佈為原則。其中點位 1 至點位 5 位於龍頭地區，點位 6 至點位 10 位於樂野地區，點位皆均勻分佈於研究區中(圖 3 和圖 4)。而網路 RTK 技術監測所使用儀器型號為 Trimble R8s GPS 接收儀，定位方式採用載波相位觀測量。依產品規格書所示此儀器在進行網路 RTK 測量時，其水平精度最高可達 8 mm，而垂直精度最高達 15 mm。本文利用網路 RTK 方式監測研究區域之地表變位成果，將與 GPS-721-MRTU 儀器所監測之成果互相比較。

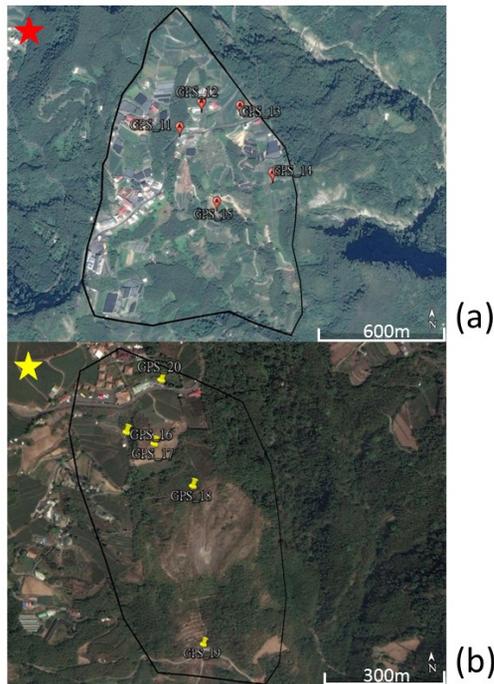
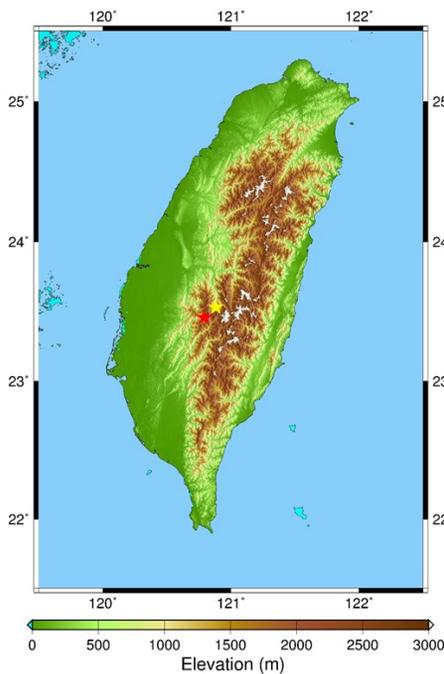


圖 2 研究地區與 GPS 測站位置示意圖。其中(a)為龍頭地區，測站編號 GPS_11 至 GPS_15；(b)為樂野地區，測站編號 GPS_16 至 GPS_20。

Figure 2 The location of study area and the distribution of the GPS stations. (a) shows the Longtou area with GPS stations “GPS_11”~”GPS_15”, and (b) shows the Leye area with GPS stations “GPS_16”~”GPS_20”

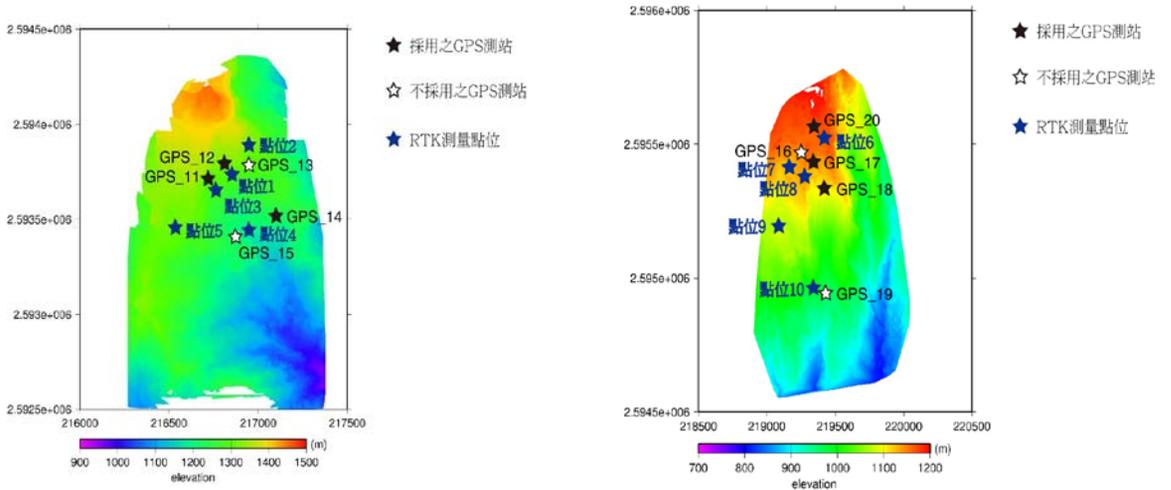


圖 3 龍頭地區地形圖。黑色星號表因資料較完整而採用之 GPS 測站，白色星號表因資料缺漏較多而不採用之 GPS 測站，藍色星號表 RTK 位移監測所選用之點位。

Figure 3 The terrain of the Longtou area. The black and white stars mean the GPS stations used and not used in this study. The blue stars mean the RTK stations.

圖 4 樂野地區分層設色圖。黑色星號表因資料較完整而採用之 GPS 測站，白色星號表因資料缺漏較多而不採用之 GPS 測站，藍色星號表 RTK 位移監測所選用之點位。

Figure 4 The terrain of the Leye area. The black and white stars mean the GPS stations used and not used in this study. The blue stars mean the RTK stations.



徐志馨、蕭宇仲：

以低成本 GPS 技術進行崩塌潛勢區地表位移監測

圖 5 GPS 接收器型號 GPS-721-MRTU。(圖片來源：泓格科技)

Figure 5 The GPS-721-MRTU GPS receiver.

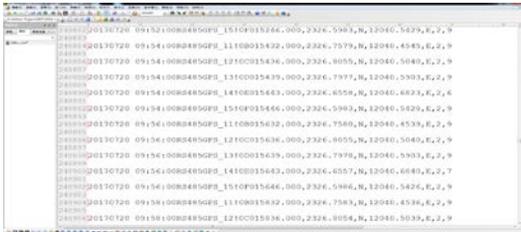


圖 6 GPS-721-MRTU 接收儀之資料格式。資料內



圖 7 GPS 監測站設備箱示意圖。(圖片來源：亞際工程技術顧問有限公司，2017)

Figure 7 The equipment box of the GPS station

三、結果與討論

3.1. 濾波方法與單窗寬度之選擇

本研究分別先採取高斯濾波與平均值濾波降低原始 GPS-721-MRTU 觀測量誤差，研究中陸續使用照窗寬度 360 分鐘 (1/4 天)、720 分鐘 (1/2 天)、1440 分鐘 (1 天)、2880 分鐘 (2 天)、4320 分鐘 (3 天) 對初步資料進行濾波，並將結果相互對比，以觀察使用何種濾波方法與濾波單窗寬度呈現之結果最為合適。

以 GPS_14 測站為例，經兩種濾波方式後與各

容包含日期與時間、測站編號、經緯度坐標、接收衛星數等。

Figure 6 The data format of the GPS-721-MRTU GPS receiver. The data include the date, the time, the number of the station, the longitude of the station, the latitude of the station, and the number of satellites.

種單窗寬度濾波後之坐標時間序列資料成果，分別計算其標準偏差後，比較兩種濾波方式之標準偏差與各種單窗寬度濾波之關係，並繪製成二次曲線圖，其東西方向與南北方向結果如圖 8 所示，藍色虛線為高斯濾波於不同照窗寬度下標準偏差組成之二次多項式曲線，公式及判定係數如藍字所示；同理橘色虛線為平均值濾波之二次多項式曲線，公式及判定係數如橘字所示。由判定係數 R^2 值來看，東西方向高斯濾波之判定係數為 0.83，高於平均值濾波之判定係數 0.72；而南北方向高斯濾波之判定係數為 0.91，同樣高於平均值濾波之判定係數 0.81，綜上所述，吾人認為高

斯濾波較平均值濾波適用於本研究。從二次多項式曲線變化來看，可見無論東西或南北方向，在單窗寬度 2880 分鐘(2 天)之標準偏差下，曲線已趨近平緩，而單窗寬度 4320 分鐘(3 天)之標準偏差與前者相比幾乎無變化，故本研究後續各 GPS 監測站，均以高斯濾波方法在單窗寬度 2880 分鐘(2 天)下先對原始 GPS 觀測資料先行處理。

3.2. GPS 地表位移監測成果

圖 9 與圖 10 為龍頭地區與樂野地區共 6 個 GPS 監測站之位移成果，本研究將經高斯濾波單窗寬度 2880 分鐘(2 天)處理後之坐標資料，分為東西方向與南北方向並按時間排序繪成坐標位置變化圖，圖中坐標變化隨紅色線所表示，橫坐

標軸表示日期變化，左側縱坐標軸為 TWD97 坐標(m)，右側表示日雨量(mm)，日雨量變化如藍色長條圖所示。本研究使用之日雨量資料乃參考中央氣象局之龍美雨量站 2017 年逐日降水量年表，而龍美雨量站分別與龍頭地區、樂野地區直線距離僅約 4.5km 和 7.5km，故應具有代表性。

將各測站濾波後之坐標時間序列進行線性回歸後，可計算出觀測時間內之位移量，其各站結果如表 1 所示，東西方向位移為正(負)表示地表有往東(西)方位移之結果；南北方向位移為正(負)表示地表有往北(南)方位移之結果。其綜合結果表示兩區有朝東北方向位移之趨勢，移動量可達數十公分以上，後續這些成果將與網路 RTK 監測位移成果比較。

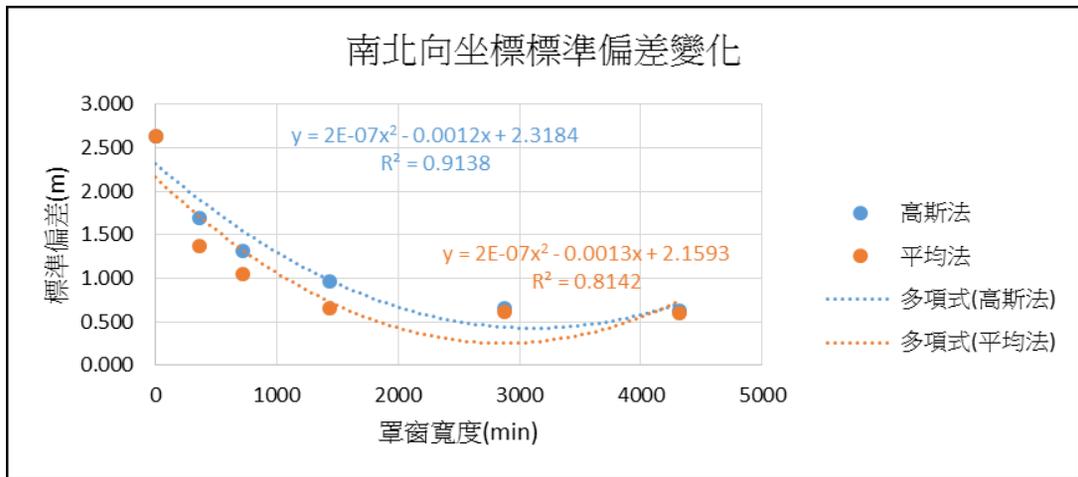


圖 8 GPS_14 測站坐標值標準偏差與濾波單窗寬度關係。

Figure 8 The relationship between the standard deviations of the coordinate values and the window widths of filtering at the GPS station “GPS_14”.

表 1 各 GPS 測站位移量成果

Table 1 The surface displacement result at each GPS station.

測站	東西向位移(m)	南北向位移(m)	東西向標準差(m)	南北向標準差(m)
GPS_11	0.51	-0.26	0.72	0.76
GPS_12	0.25	0.13	0.48	0.80
GPS_14	-0.12	0.25	0.32	0.66
GPS_17	0.70	0.56	0.62	0.97

GPS_18	0.53	0.53	0.44	0.59
GPS_20	-1.43	0.29	0.81	0.84

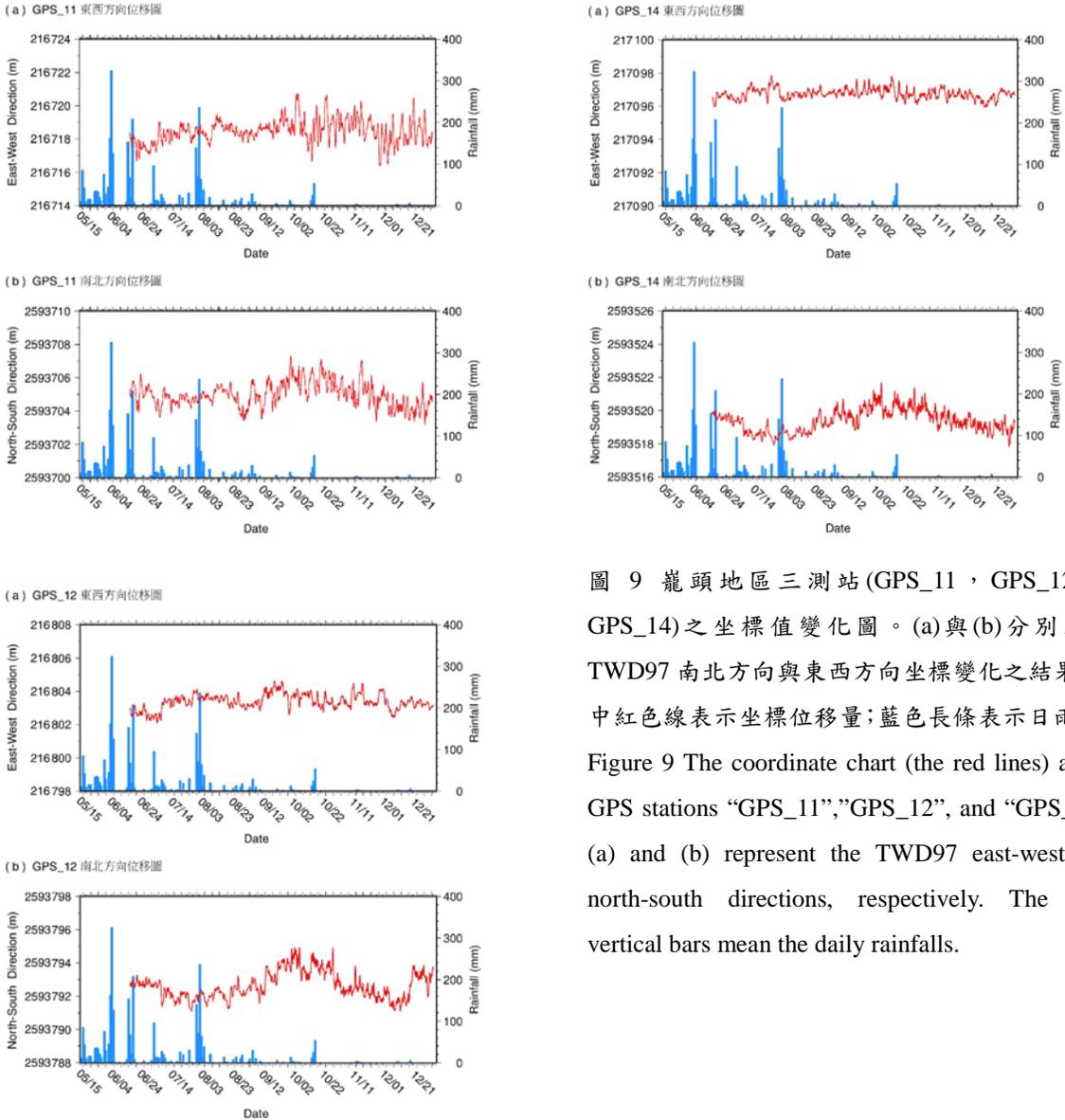
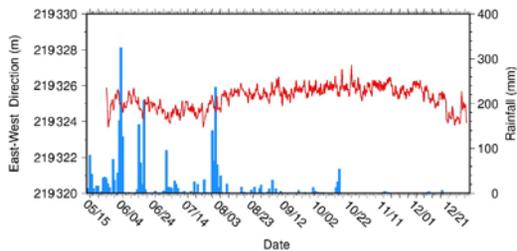
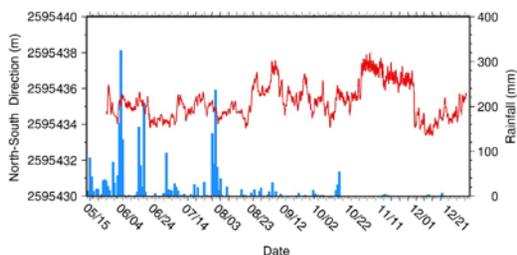


圖 9 龍頭地區三測站(GPS_11，GPS_12 與 GPS_14)之坐標值變化圖。(a)與(b)分別表示 TWD97 南北方向與東西方向坐標變化之結果，其中紅色線表示坐標位移量；藍色長條表示日雨量。Figure 9 The coordinate chart (the red lines) at the GPS stations “GPS_11,” “GPS_12”, and “GPS_14”. (a) and (b) represent the TWD97 east-west and north-south directions, respectively. The blue vertical bars mean the daily rainfalls.

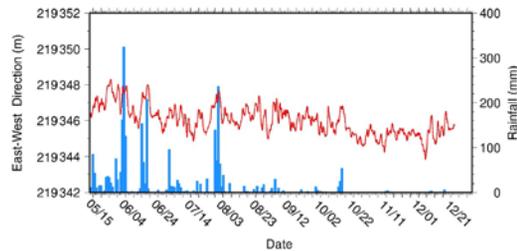
(a) GPS_17 東西方向位移圖



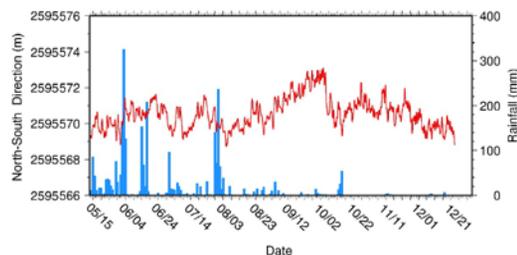
(b) GPS_17 南北方向位移圖



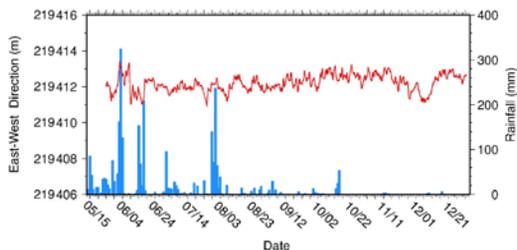
(a) GPS_20 東西方向位移圖



(b) GPS_20 南北方向位移圖



(a) GPS_18 東西方向位移圖



(b) GPS_18 南北方向位移圖

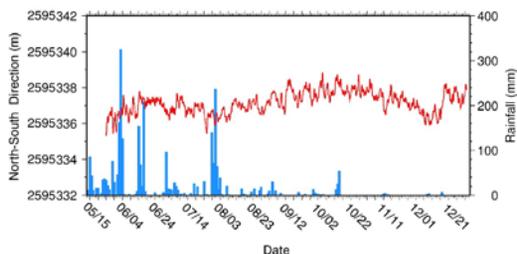


圖 10 樂野地區三測站(GPS_17, GPS_18 與 GPS_20)之坐標值變化圖。(a)與(b)分別表示 TWD97 橫坐標與縱坐標變化之結果,其中紅色線表示坐標位移量;藍色長條表示日雨量。

Figure 10 The coordinate chart (the red lines) at the GPS stations “GPS_17,” “GPS_18”, and “GPS_20”. (a) and (b) represent the TWD97 east-west and north-south directions, respectively. The blue vertical bars mean the daily rainfalls.

3.3. 網路 RTK 地表位移監測成果

本研究於兩研究區各選擇五處點位,並分別於 2017 年 7 月 4 日、2017 年 10 月 19 日、2017 年 11 月 24 日與 2018 年 3 月 1 日四個時間點,使用網路 RTK 技術取得點位坐標,以作地表位移監測,並與 GPS-721-MRTU 之 GPS 監測成果相互比較探討。

圖 11 與圖 12 為龍頭地區與樂野地區經四次

網路 RTK 測量後,相對第一次(2017 年 7 月 4 日)之坐標變化圖,坐標變化分東西向和南北向。監測期間內龍頭地區各測點平均往西位移 4 公分、平均往北位移 0.8 公分;而樂野地區各測點平均往西位移 0.5 公分、平均往北位移 0.3 公分。監測期間之位移向量如圖 13 所示,龍頭地區有往西北西位移趨勢;而樂野地區移動量級較小,無明顯位移趨勢。然圖 11 與圖 12 結果顯示 2017 年 11 月 24 日之測量結果(第三次結果)與整體移動趨勢

相悖，點位有朝東南方向移動之現象，此乃 2017 年 11 月 22 日嘉義縣阿里山鄉發生芮氏規模 5.5 的有感地震，而後隔天(23 日)又陸續發生多次餘震，進而使研究區兩天內產生明顯地表位移。將網路 RTK 第三次與第四次結果相比較，可得地震後之地表水平位移量，其中龍頭地區平均往東移動 1.3 公分、平均往南移動 0.7 公分；樂野地區平均往東移動 1.1 公分、南北向平均 0.1 公分。

根據交通部中央氣象局委託中華民國地球物理學會之「台灣 GPS 連續觀測資料分析與地震前兆偵測研究」計畫成果報告中所示，2005-2012 年台灣 GPS 連續觀測站相對於澎湖白沙之地殼水平移動速度場，如圖 14。紅色星形（龍頭地區）與黃色星形（樂野地區）處呈西北西方向之水平運動，此移動趨勢為板塊運動所致，網路 RTK 監測位移成果與之一致，而研究區域之坡向主要為東南向與南向(亞際工程技術顧問有限公司，2017)，由此可證明研究區域於觀測期間並無地滑現象發生。

由網路 RTK 監測位移成果與 GPS-721-MRTU 監測位移成果可發現，兩者之差距甚大，可達數十公分以上，由於網路 RTK 技術採用相位觀測量，且使用的儀器 Trimble R8s 為觀測精度甚高之 GPS 接收儀，故其成果較準確。而由 GPS-721-MRTU 監測位移成果可發現，雖然研究中已採用濾波處理技巧，但大氣與衛星軌道誤差依然有部分存在於觀測資料中。

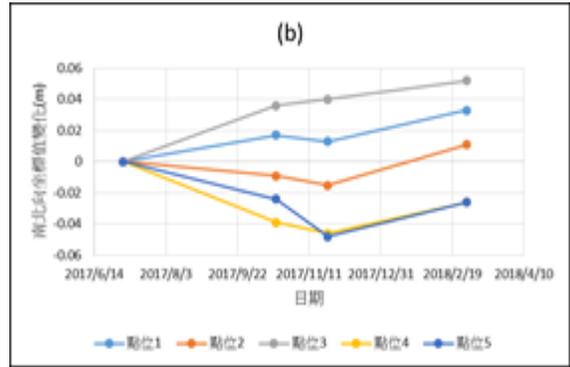
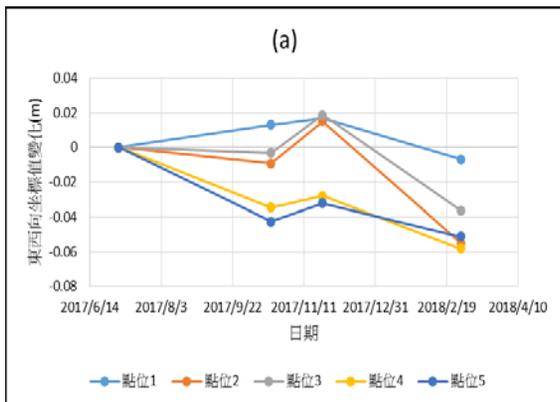


圖 11 龍頭地區網路 RTK 技術位移成果。

Figure 11 The surface displacement result using the network RTK technique at the Longtou area.

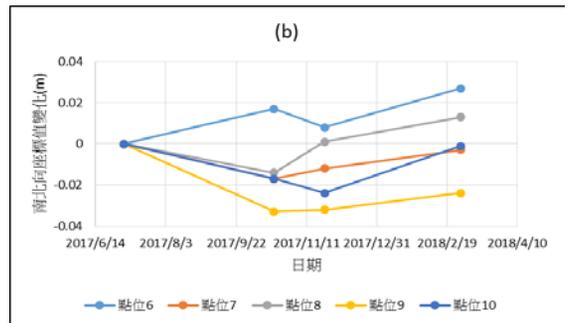
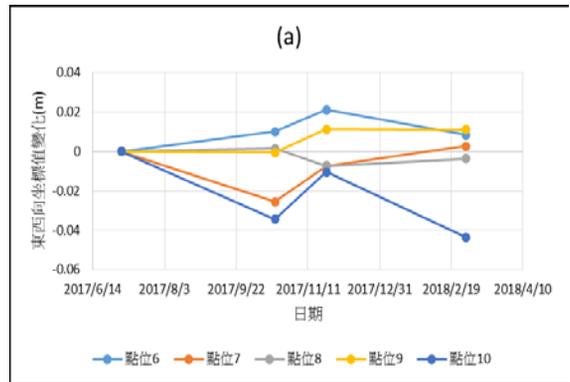


圖 12 樂野地區網路 RTK 位移成果。

Figure 12 The surface displacement result using the network RTK technique at the Leye area.

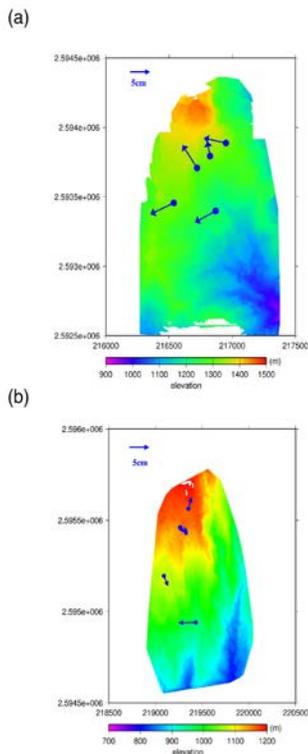


圖 13 網路 RTK 位移向量圖。其中(a)龍頭地區(b)樂野地區。

Figure 12 The surface displacement vectors using the network RTK technique at (a) the Longtou, and (b) the Leye areas.

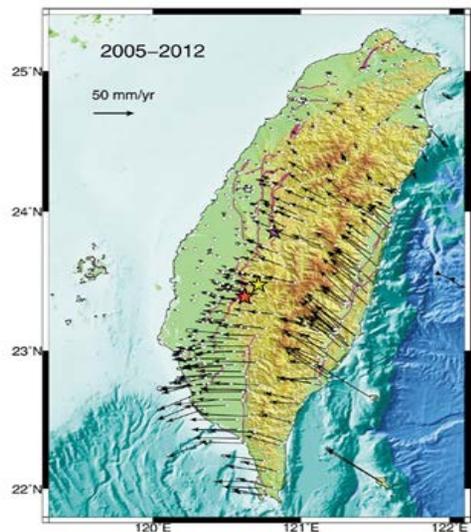


圖 14 2005-2012 年台灣 GPS 連續觀測站地殼水平運動速度場，紫色星形為 1999 年集集大地震震央，紅色星形為龍頭地區，黃色星形為樂野地區，紫色線則代表活斷層。(圖片來源:中華民國地球物理學會，2012)

Figure 14 The horizontal velocity field of the crust observed by the Taiwan continuous GPS stations in 2005-2012. The purple star is the epicentre of the Chi-Chi earthquake in 1999; the red star is the Longtou area; the yellow star is the Leye area; the purple lines mean the active faults.

3.4. 雨量與 GPS 位移之關係

根據中央氣象局之龍美雨量站之逐日降水量年表顯示，2017 年降雨多集中在 6 至 8 月之梅雨與颱風季節，為觀察雨量多寡是否影響坐標位移變化，本研究計算 GPS-721-MRTU 監測資料中 7/29 至 8/3 多雨期間坐標值之標準差，與整體監測時間之標準差作比較，如表 2 所示，表中 7/29 至 8/3 多雨期間各 GPS 監測站之標準差為 0.17

至 0.47，相較整體標準差並無特別突出，故可知本研究中雨量多寡與坐標位移變化並無關聯。

表 2 多雨期間與全部期間之地表變位值標準差

Table 2 The standard deviations of the surface displacement values during rainy and all periods

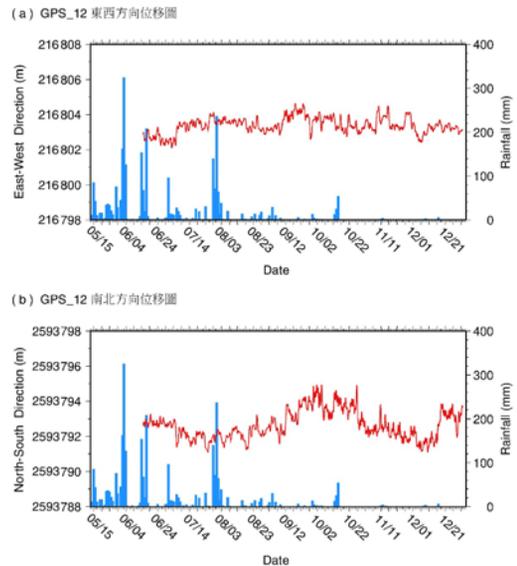
測站	東西向 標準差(7/29-8/3)	南北向 標準差(7/29-8/3)	東西向 標準差(整體)	南北向 標準差(整體)
GPS_11	0.17	0.22	0.72	0.76
GPS_12	0.20	0.22	0.48	0.80
GPS_14	0.23	0.20	0.32	0.66
GPS_17	0.24	0.28	0.62	0.97
GPS_18	0.14	0.27	0.44	0.59
GPS_20	0.47	0.31	0.81	0.84

單位:公尺

3.5. 各 GPS 測站間之相關性

本文為了解同一崩塌潛勢區之 GPS 測站結果是否具有相關性，利用皮爾森相關係數 (Pearson correlation coefficient) 作檢測，將兩個研究區 GPS 坐標變化區分東西向與南北向分析，其結果如表 3 與表 4 顯示，在東西方向龍頭地區與樂野地區結果大致呈低度相關，而在南北方向兩地區則大致呈中度相關。

其中 GPS_12 與 GPS_14 在南北方向相關係數為 0.74，呈高度相關，觀察圖 9 可發現兩站在南北方向有週期性的變化，其波谷約位在 8/3；波峰約在 10/12。而對照其他 GPS 測站坐標值變化圖，雖不如上述兩站明顯，但也有類似現象。



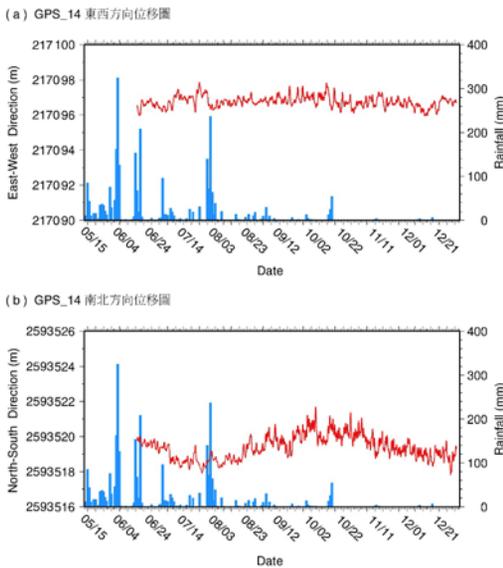


圖 9 龍頭地區三測站(GPS_11, GPS_12 與 GPS_14)之坐標值變化圖。(a)與(b)分別表示 TWD97 南北方向與東西方向坐標變化之結果,其中紅色線表示坐標位移量;藍色長條表示日雨量。
Figure 9 The coordinate chart (the red lines) at the GPS stations “GPS_11”, “GPS_12”, and “GPS_14”. (a) and (b) represent the TWD97 east-west and north-south directions, respectively. The blue vertical bars mean the daily rainfalls.

表 3 龍頭地區各測站間相關係數

Table 3 The correlation coefficients between each GPS station at Longtou area.

東西向			
	GPS_11	GPS_12	GPS_14
GPS_11		0.38	0.13
GPS_12	0.38		0.42
GPS_14	0.13	0.42	

南北向			
	GPS_11	GPS_12	GPS_14
GPS_11		0.53	0.56
GPS_12	0.53		0.74
GPS_14	0.56	0.74	

表 4 樂野地區各測站間相關係數

Table 4 The correlation coefficients between each GPS station at Leye area.

東西向			
	GPS_17	GPS_18	GPS_20
GPS_17		0.42	-0.34
GPS_18	0.42		-0.12
GPS_20	-0.34	-0.12	
南北向			
	GPS_17	GPS_18	GPS_20
GPS_17		0.47	0.43
GPS_18	0.47		0.57
GPS_20	0.43	0.57	

3.6. GPS 相對誤差成果

為了解 GPS-721-MRTU 觀測期間內, GPS 接收儀在系統誤差方面是否有逐漸累積現象, 和觀測系統誤差對位移成果的影響, 本研究於兩研究區各擇一測站, 並採用兩種方法計算:

(一)方法一

由網路 RTK 成果顯示, 兩研究區於監測期間內實際整體位移僅 1-2 公分, 此量級相對 GPS 位移成果之上下變化幅度可以忽略, 故假設監測點位於監測期間並無移動之現象。吾人將原始資料

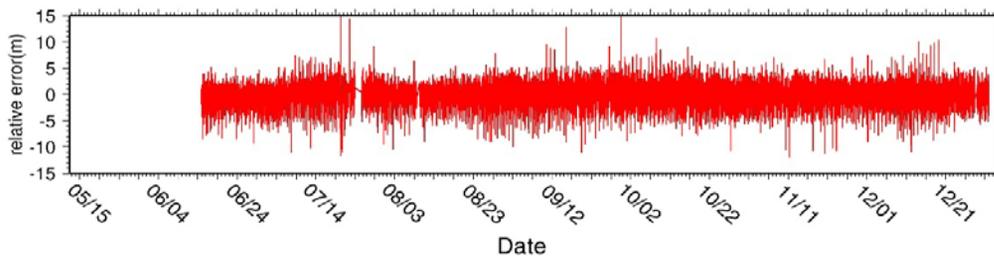
中第一筆資料視為原點，而後續資料序列皆減去第一筆資料，其計算出之相對誤差如圖 15 和圖 16 顯示，結果表明兩研究區並無明顯系統誤差積累現象。

(二)方法二

此相對誤差計算方法為將監測期間內每天收到之第一筆資料皆視為原點，後將原始資料中每

筆資料，分別減去該天第一筆接收到之資料，計算結果如圖 17 和圖 18 顯示，從圖中發現兩測站無論在東西或南北方向，皆有週期性變化之現象產生，當東西向相對誤差往正(負)方向波動時，南北向相對誤差則往負(正)方向波動；波動變化現象呈東南方向與西北方向相互循環，週期變化約為兩個月。發生此現象之原因推測與衛星軌道週期、大氣季節變化等因素有關，有待後續進一步研究觀察。

(a) 東西方向相對誤差



(b) 南北方向相對誤差

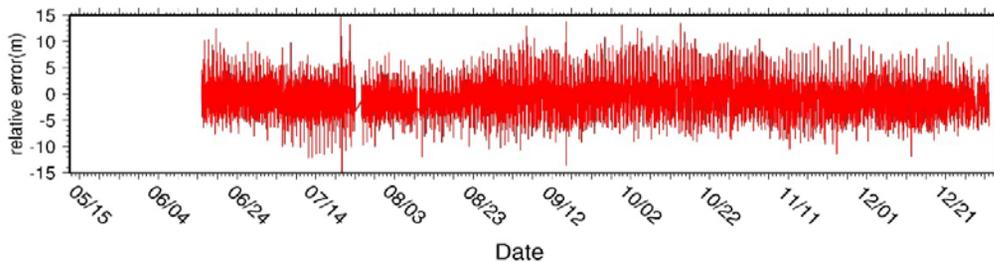
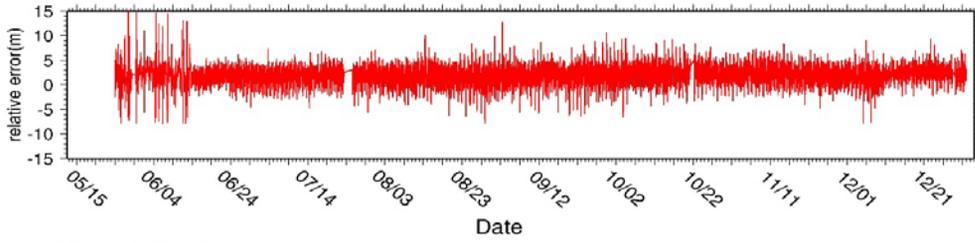


圖 15 方法一在 GPS_14 測站上之相對誤差成果。

Figure 15 The relative errors derived from Method 1 at the GPS station “GPS_14”.

(a) 東西方向相對誤差



(b) 南北方向相對誤差

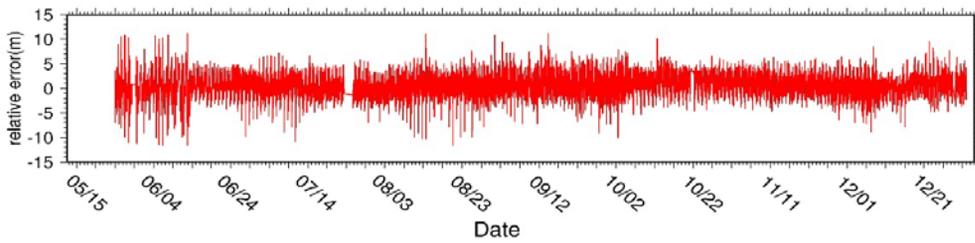
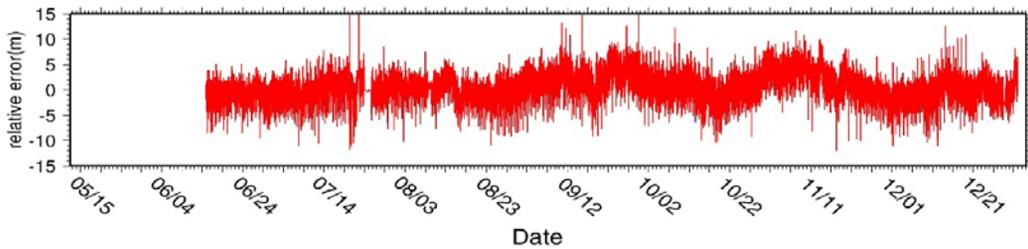


圖 16 方法一在 GPS_18 之相對誤差成果。

Figure 16 The relative errors derived from Method 1 at the GPS station “GPS_18”.

(a) 東西方向相對誤差



(b) 南北方向相對誤差

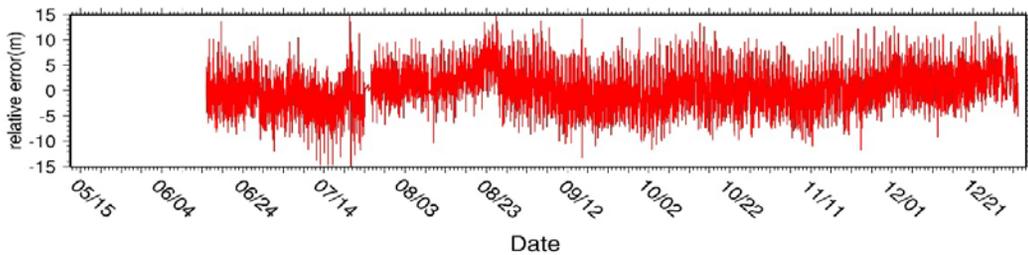
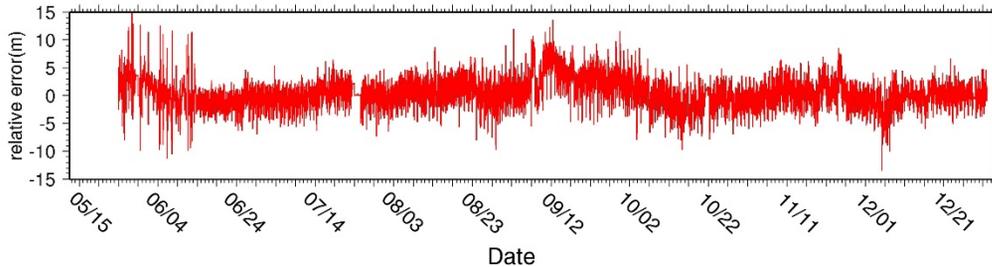


圖 17 方法二在 GPS_14 測站上之相對誤差成果。

Figure 17 The relative errors derived from Method 2 at the GPS station “GPS_14”.

(a) 東西方向相對誤差



(b) 南北方向相對誤差

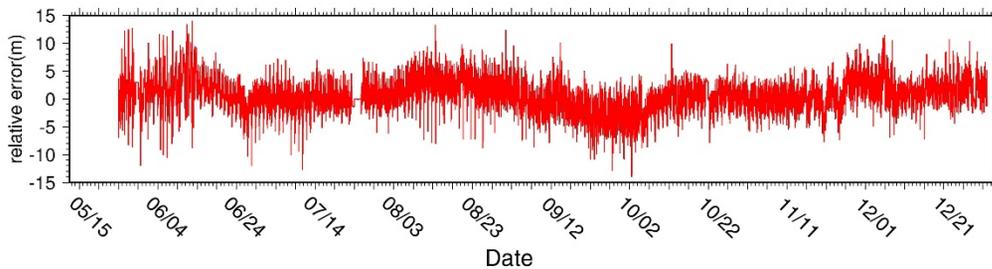


圖 18 方法二在 GPS_18 測站上之相對誤差成果。

Figure 18 The relative errors derived from Method 2 at the GPS station “GPS_18”.

四、結論與建議

1. 本研究以低成本單頻 GPS 接收儀(型號 GPS-721-MRTU)與網路 RTK 技術，於兩塊崩塌潛勢區 - 龍頭地區與樂野地區，實施長期地表位移監測。
2. 分別將高斯濾波與平均值濾波方式之標準偏差和各種單窗寬度濾波之關係，繪製成二次曲線圖。由判定係數 R^2 值來看最適合本研究之濾波方式為單窗寬度 2880 分鐘之高斯濾波。
3. 各 GPS 測站坐標序列進行線性回歸，計算出觀測時間內之位移量，其位移達數十公分，要觀察公分等級之地表位移量，以 GPS-721-MRTU 接收儀之虛擬距離觀測量解算並不合適，若使用低成本之單頻 GPS 進行類似監測，建議取得 Rinex 數據格式，使用載波相位觀測量並配合較精密之星曆解算。而本研究雨量並不影響位移成果。
4. 以網路 RTK 技術監測地表位移，發現龍頭地區有往西北西方位移趨勢，與板塊運動造

成之位移趨勢相符；而樂野地區移動量級較小，無明顯位移趨勢。其中龍頭地區各測點平均往西位移 4 公分、平均往北位移 0.8 公分；而樂野地區各測點平均往西位移 0.5 公分、平均往北位移 0.3 公分。而芮氏規模 5.5 地震導致位移也被網路 RTK 監測方法捕捉。

5. 研究區朝西北西方向水平移動，與板塊運動方向有關，而研究區域之坡向主要為東南向與南向，由此可證明研究區域於觀測期間並無地滑現象發生。
6. GPS-721-MRTU 為低成本之單頻 GPS 接收儀，在水平精度上面雖不盡理想，但在定位方面仍有週期性變化，若把觀測時間延長，此接收儀將有助於在 GPS 時間序列週期變化或大氣科學等方面的研究。
7. GPS 相對誤差方法一說明監測成果並無明顯系統誤差積累現象。方法二則發現此 GPS 接收儀坐標時間序列有周期性波動變化現象，且呈東南方向與西北方向相互循環，週期變化約為兩個月。發生此現象之原因推測與衛星軌道週期、大氣季節變化等因素有關，有待後續進一步研究觀察。

誌謝

本文為行政院農業委員會水土保持局南投分局委託亞際工程技術顧問有限公司之「隙頂集水區(嘉義縣-阿里山鄉-D007 大規模崩塌地區)設施調查及土砂災害風險評估與策略因應」計畫(計畫編號：SWCB-106-241)之研究成果之一。

參考文獻

- [1] 內政部國土測繪中心(2007)，「e-GPS 定位

系統應用於基本控制測量作業之研究」，內政部國土測繪中心自行研究報告。

- [2] 中華民國地球物理學會(2012)，「台灣 GPS 連續觀測資料分析與地震前兆偵測研究」，交通部中央氣象局委託研究計畫期末成果報告。
- [3] 亞際工程技術顧問有限公司(2017)，「隙頂集水區(嘉義縣-阿里山鄉-D007 大規模崩塌地區)設施調查及土砂災害風險評估與策略因應」，行政院農業委員會水土保持局南投分局委託計畫報告。
- [4] 崔國強、王敏浩(2006)，「網路 RTK 於地籍測量應用之研究—以花蓮地區為例」，中華民國地籍測量學會會刊，第 25 卷第 3 期，17-34.頁。
- [5] 施亘昶(2010)，「多重高度空載重力測量應用於計算大地起伏和黑潮」，國立交通大學土木工程學系博士論文。
- [6] 莊智清(2012)，「衛星導航」，全華圖書股份有限公司。
- [7] 楊名(2007)，「GPS/Galileo 整合式導航系統對於網路型即時動態定位技術之衝擊：區域性大氣層模式之估計與參考站網型設計」，行政院國家科學委員會委託研究計畫。
- [8] 饒正、陳志芳、林雅雯等(2008)，「全球衛星定位與自動化監測系統在坡地防災之應用」，交通部運輸研究所。
- [9] 饒瑞鈞(2018)，「精緻化坡地大規模崩塌調查、監測技術及潛勢與影響分析研究-以荖濃河流域及廬山地區板岩帶為例-子計畫:利用單頻 GPS 連續站觀測分析深層崩塌變形機制」，行政院科技部委託研究計畫。
- [10] Seeber, G. (2003). Satellite Geodesy, 2nd

Edition. Walter de Gruyter, New York.

- [11] Squarzoni, C., Delacourt, C., and Allemand P. (2005). Differential single-frequency GPS monitoring of the La Valette landslide (French Alps). *Engineering Geology*, Elsevier.

- [12] Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R.,
-

Luis, J. F., and Wobbe, F. (2013). Generic mapping tools: Improved version released. *EOS Trans. San Francisco, USA: AGU*.

107 年 07 月 20 日收稿

107 年 08 月 09 日修改

107 年 08 月 21 日接受