

# 空載光達技術進行地層下陷監測之可行性分析

## The Feasibility of airborne LIDAR technology for land subsidence monitoring

邱式鴻<sup>1</sup> 李景中<sup>2</sup>

Shih-Hong Chio Chin-Chung Lee

### 摘要

地層下陷是台灣西南部地區嚴重的問題，受地層持續下陷影響，每當颱風侵襲期間，持續性的大雨或豪雨之後常導致排水不良，造成相當嚴重的災情。因此，為求有效了解地層下陷量並進行地層下陷監控，地表空間資訊獲取方式中已有傳統的精密水準測量，以及 GPS 高程測量方法實際應用於地層下陷量的監測。然這兩種監測方式均需藉到現地觀測，且觀測資訊均屬點或線的分佈型態，除較無法獲取全面性的監測資料之外，所需要的時間成本也較多。因此，本研究擬以最新的空載光達測量技術，利用其能在短時間自動獲取大區域範圍且具高精度高密度的特性進行地層下陷可行性的探討與評估。以目前空載光達測量技術，可達到的高程精度約為 15cm，且可提供甚多之細節。若評估可行，將來將更有助於未來地層下陷監測工作之進行和後續地層下陷成因之分析。

關鍵詞：地層下陷、光達、數值地型模型、災害模擬。

### Abstract

Land subsidence along the southwestern area in Taiwan is a serious problem. The continuous land subsidence leads to the poor drainage, causing serious flood during the heavy rainfall. Therefore, traditional precise leveling surveying and GPS height surveying techniques have been implemented for effective land subsidence monitoring. However, these two surveying techniques are time-consuming and not cost-effective because they need to collect the height data by setting up the instruments on site. In addition, those collected point-scattering or profile-scattering data cannot provide the global data for whole area to conduct comprehensive analysis and evaluation for land subsidence. Therefore, this study will evaluate and investigate the feasibility of airborne LIDAR (Light Detection And Ranging) data for land subsidence. Airborne LIDAR data is acquired by airborne LIDAR surveying technique. This whole new surveying technique can collect 3-D point clouds with high height accuracy and high point density in short time. Thus it is highly potential to provide global data for land subsidence without time-consuming and cost-effective. If the land subsidence

<sup>1</sup> 國立政治大學地政學系 副教授，[chio0119@nccu.edu.tw](mailto:chio0119@nccu.edu.tw)，02-29393091 # 51657

<sup>2</sup> 國立政治大學地政學系 碩士在職專班，[jin-jone@mail.ccc.com.tw](mailto:jin-jone@mail.ccc.com.tw)，02-66306500#211

monitoring by using airborne LIDAR data is feasible, the research results will be useful for future land subsidence monitoring and analysis.

**Key Words:** Land subsidence, LIDAR, DEM, Disaster Simulation

## 一、前言

台灣西部沿海地區地勢低窪，受地層持續下陷影響，排水不良問題相當嚴重，每當颱風侵襲期間，持續性的大雨或豪雨之後常導致淹水災情，若適逢大潮導致海水倒灌，則淹水災情更是嚴重。

台灣地區地層下陷問題肇始於六十年代迄今已逾三十餘載，持續下陷面積已達 1,140 平方公里，最大累積下陷量達到三公尺以上(陳志芳、賴聖耀，1994)，主要區域集中在彰化、雲林及嘉義之沿海及內陸地區。

造成地層下陷的主要原因之一為自然的地質作用，尤其是台灣西南部平原及沿海地區，其地層多屬河流或洪流沖積土砂而構成之沖積平原，由於各沖積平原之土層構造，較為鬆軟及特殊，土層堆積而造成土砂顆粒間自然壓密所形成之緩慢地層下陷自然不可避免。另一個造成地層下陷的主因則是人為因素，也就是土地之過度開發與利用，尤其近年來，使得地層下陷之幅度與速率有加快之現象，例如地下水超抽。而地層因累積下陷量降低地面高程之影響，減弱河海堤保護標準、阻滯排水設施功能發揮，致易遭洪泛或暴潮溢淹災害之侵襲。因此對於地層下陷之現象，必須整合分析相關的空間資料觀測成果，協助地層下陷的成因、機制、防治與風險進一步的研究分析，期能發展完整有效的監測系統達到減低地層下陷造成之損害。因此，經濟部水利署和財

團法人工業技術研究院建立了地層下陷資訊管理系統提供台灣地區地層下陷資料整理、地陷知識簡介、相關文獻整理、進行 Web GIS 查詢與最新訊息瀏覽(經濟部水利署, 2007)。

此外，目前政府對地層下陷的防範措施是定期進行地層下陷監測，並進行「嚴重地層下陷地區」劃設作業，提供防洪排水與防災設施之興建及改善工程之參考。根據經濟部「嚴重地層下陷地區劃設作業規範」，劃設或變更嚴重地層下陷地區之參考資料有兩種，第一種為地層下陷資料，包括符合二等水準點閉合標準之地面高程檢測資料及經濟部水利署管理之地層下陷監測井資料。此外，全球定位系統(Global Positioning System, GPS)高程測量、驗潮站資料配合其他測量技術、航測(Aerial Photogrammetry)、衛星遙測(Remote Sensing)及其他監測技術等也經常應用於地層下陷監測。第二種為易淹水區域資料，包括以經濟部水利署繪製之感潮線、台灣地區常淹水地區及颱風豪雨水災常淹水地區等區域之聯集為主，各縣(市)政府淹水地區調查資料為輔。

而地層下陷的監測方法包括利用(一)水準測量、(二)衛星定位測量、(三)遙測 INSAR 干涉量測技術的地表監測方法(柳志錫、譚凱英,2006)和利用(一)單管式、(二)雙管式、和(三)無線電波分層式監測井的地下監測方法。此外，空載光達(LIDAR)技術，因為可於短時間內獲取大片面積高密

度且高精度的高程資料，其高程精度達公寸級(史天元、彭森祥，2003)，因此可利用於地表較細微的地形變化監測，而對於地層下陷監測則有應用的可能性。若對於監測區域再獲取遙測影像，則可進一步建立當地的土地覆蓋及利用之資訊，有助於後續地層下陷成因之分析。

至目前為止，在地層下陷監測方面仍以精密水準測量方法為最普遍且精度較高。然而水準測量作業相當耗費人力、時間甚多、不易自動化，且測量之時間間隔較大，不易獲得連續之地層下陷資料。目前水利單位於沿海地層下陷較嚴重之地區施行傳統水準測量即限於人力時間，故平均 2~3 年方得輪流施測一次。此外水準測量所得為單點高程資訊，無法完整呈現全區域整體地層下陷現況。為了進行淹水分析及模擬，尚須取得網格形式之資料，其作法之一是將擬檢討地區分割為長寬各一公里之正方形網格，並將具有參據之累積下陷量與近年地層下陷年平均速率地層下陷檢測資料，經空間內插方法分配於網格中。此外，不論是大地水準測量、地層下陷監測井或是 GPS 高程資料，均需藉由觀測儀器親臨現場測量，且觀測資料型態皆屬於點分佈資料或是斷面資料，觀測點位的分佈及密度或是斷面的位置將影響到網格資料的空間內插結果，而所採用的內插方式亦是重要的影響因素之一。倘能透過空載光達掃描空間資訊技術獲取地表三維資訊之變動量，不僅可節省相當大人力及時間，且可瞭解大面積區域之地層下陷之趨勢及分佈。

空載光達(LIDAR)或稱雷射掃描

儀(Airborne Laser Scanner)之量測技術乃利用雷射掃描方式，大量且快速地向地面發射雷射光波，藉由感測器接收雷射反射訊號，經電腦計算處理後得到地面掃描點之三維坐標，進而達到獲取地物三維空間坐標之目的。經由光達點雲(Point Clouds)資料之處理可以直接獲得稱數值地形模型(DEM)資料及三維建物模型等資料。故如何利用空載光達技術快速獲取三維空間資訊，進行以空載光達資料進行地層下陷監測的可行性探討則為本研究之主要研究目的。

而過去有關地層下陷監測分析的空間資料觀測成果包含年度性的水準觀測資料、GPS 固定站資料、不同時期的數值地形模型(DEM)資料、地下水位監測井資料、及重力觀測資料等，如前所述，這些資料對地層下陷現象而言，有些是點或線的描述，有些則是面的描述，資料的分佈、觀測時期、精度、及參考系統相當多元，但空載光達技術比起水準觀測及 GPS 觀測機動性更強且可以以更高效率，於短時間內獲取大面積且高密度的高程資料。若研究確實可行，將更有助於未來進行地層下陷監測工作之進行且對後續地層下陷成因之分析更將有所助益。

## 二、文獻回顧

如前所述，地層下陷的監測方法包括利用(一)水準測量、(二)衛星定位測量(GPS)、(三)遙測 INSAR 干涉量測技術的地表監測方法(柳志錫、譚凱英，2006)和利用(一)單管式、(二)雙管式、和(三)無線電波分層式監測井的地下監測方法。其中空間技術主要

用於地表的監測，除了傳統的精密水準測量之外，還有 GPS 測高已經實際應用於地層下陷的研究中，如彭森祥等人(2001)針對地層下陷分析為應用目的，探討 GPS 測高作業模式，文中探討觀測的需求條件、作業模式、分析步驟等，最後並比對 GPS 下陷量與水準觀測下陷量之驗證分析。研究成果顯示，施測範圍 800 平方公里，以兩個時期 GPS 網所得到之下陷量與兩個時期水準所獲得之下陷量驗證精度，由 8 個驗證數據顯示，GPS 與水準作業最大差值 11mm，平均 4mm。而洪偉嘉等人(2006)應用 GPS 技術，分別於彰化、雲林地區設置 GPS 固定站，以遠端傳輸及監控方式，對主要下陷區做全天候監控。另外對於雲林縣全區利用 GPS 技術搭配所研發之 GPS 監測樁實行高程監測。經實測成果顯示，應用 GPS 技術進行地層下陷監測，為確實可行的方法。

上述利用 GPS 測高進行地層下陷的監測必須由觀測儀器親臨現場測量，且觀測資料型態屬於點分佈資料，觀測點位的分佈位置及密度將影響地層下陷之分析與判斷，且較不易進行全面性的下陷分析。為了不需赴現場觀測，節省人力及時間，且可瞭解大面積區域之地層下陷趨勢及分佈，則有王志添等人(2001)研究利用合成口徑雷達(SAR)之差分干涉測量法，求取地表位移量，估算台灣東南部東港沿海地區(約 45 公里 x 25 公里)地表下陷情形。此法是以三軌道差分干涉方式，選用 ERS1 與 ERS2 之合成口徑雷達資料分別為 1996 年 1 月 31 日、2 月 1 日、5 月 16 日。前兩張影像日期差一天為 Tandem Mode

資料，具有高同調性，以此產生地形之干涉圖像及數位地形，與選擇另一張影像，具有同調性且時間差為 105 天之影像，產生差分干涉圖像，求取地表位移量估算地表下陷情形。將求出之地層下陷與同年下半年中央地質調查所於該地區以 GPS 作地面觀測資料比較分析，得到一致之下陷趨勢，首次證明差分干涉法於亞熱帶多植物的台灣地區之下陷監測具有實用價值。此外，謝嘉聲與史天元(2006)以 ERS 的衛星雷達影像，利用差分干涉的技術產生在地形平坦區域的位移圖形，以偵測地震的地表變形情形。為能確實的比較所獲得的結果，將 GPS 量測所得點位變動資料，經內插處理及坐標轉換後，形成雷達坐標系統之干涉條紋圖，以檢驗雷達干涉所獲得之結果，經比對干涉條紋圖後，兩者間干涉條紋的變化情形相當一致。

雖然遙測 INSAR 干涉量測技術的地表監測可以獲取全面性的資料，但機動性仍比不上空載光達測量技術。空載光達技術的發展，源自 1970 及 1980 年代美國太空總署(NASA)的研發，之後因應全球定位系統(GPS)及慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)的發展，使得精確的即時定位定姿態方法得以實現。經由德國 Stuttgart 大學於 1988 至 1993 年期間將雷射掃瞄技術與即時定位定姿態系統加以結合產生初始的空載雷射掃瞄儀系統(Ackermann, 1999)。所以光達測量技術就是使用雷射光束進行掃描式測量之系統，如圖 1 所示，空載光達的測量原理就是透過將雷射掃描儀固定於飛行載台上，由空中向地面

以高頻率發射雷射光束，並由感測器接收反射訊號後，記錄發射脈衝到接收反射訊號之間的時間差，載台以 DGPS 完成精密的動態定位，同時利用 INS 獲取慣性姿態維度，導出外部

參考坐標，每一次掃描皆建立自雷射載台至地面反射點間之空間向量，整合距離、位置、姿態以及坐標之資料，進而可推導出地面投影之三維坐標，使地形高程測量作業快速而準確。



圖 1 空載光達的測量原理圖示 (Renslow, 2001)

除機動性之外，空載光達測量技術還具有下列的特性(劉進金，2005)：

1. 快速測繪高精度三維坐標點
2. 獨立點與多重回訊 (Multiple echoes)
3. 受天氣影響比一般航測小

因此利用空載光達測量技術可快速獲得地形的三維地形資料，對於地形模型與地表模型的建立、地形變化的分析等，為一非常快速而有效的方法。本研究引進新科技空載光達測量技術，期待以其具備高度機動性，能快速及有效率獲取區域的三維地形資訊，和受天氣影響小的特性，並配合適當的飛航規劃，期望施測兩不同時期試驗區的地形變化。

空載光達技術機動性強且可以比使用 GPS 或水準測量以更高效率，於短時間內獲取大面積且高密度的高程資料。然光達資料其高程精度約為 15cm(Tao and Yasuoka, 2002; Lohr et

al., 2004; Habib et al., 2006)，因此是否合適用於地層下陷監測分析，實有待進一步研究，所以本研究初步先透過文獻蒐集和分析，確定應用於地層下陷的空載光達資料掃描作業方式與精度評估，蒐集試驗區現有的空載光達資料，以及蒐集試驗區另一時期的空載光達資料，探討以空載光達進行地層下陷的關鍵因素以及探討萃取穩固監測面的方法。若初步研究確實其可行性，後續將更有助於未來進行地層下陷監測工作之進行且對後續地層下陷成因之分析更將有所助益。

### 三、研究方法

本研究蒐集涵蓋目標區之不同時期之空載光達資料，期將來能分析研究兩不同時期空載光達資料高程之變化以求地層下陷量，因此本研究擬先透過文獻蒐集和分析，確定應用於

地層下陷的空載光達資料掃描作業方式，接著實際掃描光達資料並進行精度評估；此外，研究中亦將探討萃取穩固監測面的方法。研究流程如圖 2 所示。

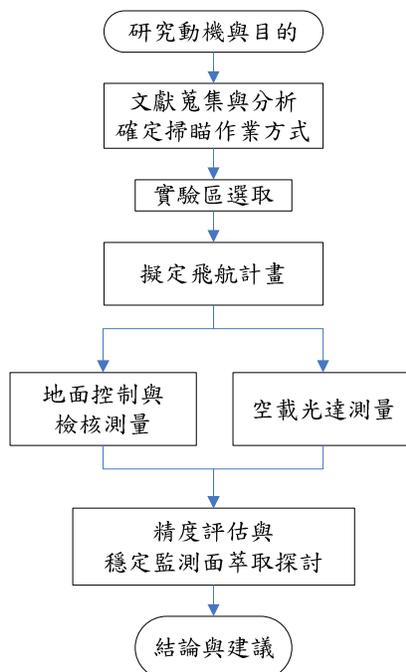


圖 2 研究流程圖

本研究的重點乃利用兩不同時期的空載光達資料進行地層下陷之分析，然目前一般經驗空載光達高程精度達 15 公分時，平面精度約在 50 公分左右(Tao and Yasuoka, 2002; Lohr et al., 2004; Habib et al., 2006)，對於試驗區雲林元長沉陷速度最近兩年約為每年 11.6 公分(經濟部水利署，2006)和 8.2 公分/年(許海龍，2007)的下陷情況進行監測，此精度不足以檢定其下陷量，因此空載光達資料的高程精度是否能透過適當的規劃掃描以達到每年地層下陷監測之應用，或是僅僅只能以間隔較長(如 2~3 年)的空載光達資料應用於地層下陷分析，這將是第一個可能遭遇的問題。

其次，產製 DSM 或 DEM 已經經過人工編修或是內插處理，以 DSM 或 DEM 來比較地層下陷將有精度不足的問題，因此地層下陷量的計算如何直接由產製的點雲資料直接計算而得，這將是第二個可能遭遇的問題。此外，不同時期空載光達具有差異性的資料有可能來自於地物變遷，因此在進一步分析地層下陷的變化量之前必須先將地物變遷的部份排除在外，才能達到真正分析地層下陷量的目標。因此，如何透過所蒐集各年度輔助資料，如光達資料、水準測量資料、GPS 觀測資料、航拍照片、雷達影像、土地使用分區、防洪公共設施等其他相關資料，協助排除地物變遷量達到

真正分析地層下陷量乃是第三個可能遭遇之問題。最後，由於空載光達資料是採用 GPS 測高的系統，而傳統精密水準測量所得的結果是正高系統，因此將來分析空載光達地層下陷量時如何透過正確的大地起伏模式修正，是第四個可能遭遇之問題。

總之，利用空載光達測量技術監測地層下陷面臨的四個關鍵技術：

- (一)、光達點雲精度是否足以判斷地層的下陷量。
- (二)、如何以點雲資料來比對不同時期的高程。
- (三)、非自然地層下陷(變動)數據的過濾。
- (四)、正確的大地起伏模式。

針對上述研究過程可能遭遇的問題分別以各小節說明如下。

### 3.1 光達點雲精度是否足以判斷地層的下陷量

本研究所選之實驗區位於雲林元長附近，此區近兩年最大年下陷速率約 11.6 公分/年和 8.2 公分/年，依彭森祥等人(2001)研究顯示地層下陷之重複監測頻率、觀測精度與下陷量規模有關，以年下陷量達 11.6 公分和 8.2 公分的地區，觀測頻率每年施測一次，觀測高程精度至少需達 5.8 公分(2 倍  $\sigma < 11.6$  公分)和 4.1 公分(2 倍  $\sigma < 8.2$  公分)。

所以提高光達點雲高程精度將可提高不同時期點雲高程比較的正确性，目前國內光達點雲成果雖然其高程已經可以達到 5 公分以內的精度水準(許海龍，2007)，但其乃依據控制點水準測量之成果進行高程約制所得，而本研究擬直接以橢球高進行地層下陷監測，因此依據各種影響空載

光達成果精度的因素探討(Maune, 2001; Morin, 2002; Maas, 2002; 陳大科等，2005; 高玉惠等，2005；劉榮寬等，2005)，原則上保留(許海龍，2007)之飛行掃描規劃，而於第 10 步驟稍作改良，期望亦能提高空載光達橢球高精度並直接運用光達資料之橢球高進行地層下陷監測，因此飛行掃描規劃如下：

1. 降低飛航高度：在飛航安全高度與航空管制高度條件下，規劃較低之飛航高度以增加雷射點反射訊號強度並減少飛航帶寬的寬度。
2. 調降雷射脈衝率：可增強接收雷射點雲的反射訊號，確保訊號接收的穩定與品質。
3. 縮小掃描角度：除可提高雷射點雲密度外，並可減少飛行時大角度掃描邊緣點位的誤差。
4. 降低飛行速度：增加雷射點雲密度，可提高觀測量的可靠度。
5. 提高 GPS 測量精度：以 24 小時連續觀測提高地面測站位置及橢球高精度；依據衛星顆數時段表、出沒軌跡圖、PDOP 值等資訊規劃最佳觀測時段。
6. 航帶重疊比例：航帶規劃左右至少各需 30% 重疊。
7. 每條航線至少應有 2 個 GPS 基站同步接收 GPS 觀測量，基站與航線範圍小於 20km。
8. 交叉飛航(Cross Flight)數據：測區範圍內航線需進行航線之起點、中間及終點各進行 1 條交叉飛航掃描，並須以掃描面積重疊範圍最大為原則。

9. 航帶平差：利用航帶平差提高實驗區雷射點雲整體的精確度。
10. 加入地面已知控制點進行約制：於全區實測控制點橢球高，比較點上雷射點之高程較差值，建立橢球高程修正模式，再利用此模式進行全區雷射點之高程修正，以期提升點位橢球高精度，進行後續分析。

### 3.2 如何以點雲資料來比對不同時期的高程

比較同區域範圍內高程差異性之相關研究如下：

1. 以航帶重疊區評估相關光達掃描精度

Latypov(2002)以地表區域範圍及平坦度為變數採用68%及95%信賴區間的統計方法(詳表1、2)，計算並篩選航帶重疊區內各區域的高程平均值與標準偏差，可求得左右航帶重疊的差異，進而評估系統誤差。此法有很多優勢，它避免了單點匹配的問題，以及在分析和檢查重疊區內明確的平坦表面時能靈活運用大小不同的地表。透過不同大小的地表，能在某些程度上區分隨機和系統的誤差。而且一個大區域的平均高程可以忽略隨機誤差的影響。

表1 面積大小與精度的關係(Latypov,2002)

Surface size (points)	Surface size A (m <sup>2</sup> )	Number of surfaces with $\hat{\sigma}_S \leq 0.21$ m	Average height difference $\bar{\delta}h$ (m)	68% Interval (m)	95% Interval (m)
1.8	N/A	867,807	0.00	0.22	0.51
8.2	9	372,021	-0.01	0.19	0.42
18.6	30	124,524	-0.02	0.17	0.38
51.5	104	27,754	-0.02	0.16	0.34
149.4	343	2804	-0.02	0.16	0.37
446.1	1102	589	-0.02	0.17	0.31
760.5	1923	240	0.00	0.16	0.31

表2 平坦度與精度的關係(Latypov, 2002)

Surface flatness $\hat{\sigma}_S$ (m)	Number of surfaces	Average height difference $\bar{\delta}h$ (m)	68% Interval (m)	95% Interval (m)
0.06	687	0.03	0.16	0.27
0.09	6326	-0.04	0.17	0.38
0.12	12,948	-0.06	0.16	0.38
0.15	18,448	-0.05	0.16	0.33
0.18	23,214	-0.06	0.17	0.35
0.30	40,864	-0.06	0.17	0.37
0.61	65,024	-0.01	0.18	0.45
1.52	78,069	0.04	0.21	0.99
3.05	81,662	0.04	0.23	1.19
15.24	89,582	0.08	0.27	6.63

Surface size: 101 m<sup>2</sup> (50 points).

上述方法雖是應用於航帶平差來解決航帶重疊區高程殘差的問題，但對於不同時期相同區域的監測工作也可參考其以區域內平均高程及平坦度為參數篩選適當的監測面，以供觀測其地層下陷的變化量。

## 2. 雷射測高地形的品質改善

荷蘭在建立國家數值高程模型時，是以大量的地面控制點來提高空載光達測量的精度，而所謂地面控制點是以一公頃大小區域內實地測量的 100 個地形點為一個控制點，該地表的選定是以運動場等較平坦的地區為主，也就是比較平坦、大區域的平均高程方法來控制光達地形模型，而平坦、大區域內多個點雲的平均高程可減少雷射噪音的誤差 (Elberink et al., 2003)，亦即以多個光達點取代單個光達點可以忽略隨機誤差的影響。假設雷射噪音誤差為 12cm，面積內點雲數量為 100 點，則平均高程的差異為  $12 \times \sqrt{2} / \sqrt{100} = 1.7\text{cm}$  (Crombaghs and Brugelmann, 2000)。

由上述分析以及由於光達平面精度較高程精度差，一般經驗空載光達高程精度達 15 公分時，平面精度約在 50 公分左右，因此本研究採用多個光達點計算出之擬合平面中心高程方式亦有上述降低隨機誤差影響的優點，因此為了避免計算高差受 DSM、DEM 模型產製時

因內插造成的精度降低，將以原始點雲擬合平面中心高程來比較不同時期同一監測面高程的變化情形。

而地層下陷分析是屬於多時期數據的變形分析應用，考慮變形觀測所需的作業設計要點 (彭森祥等人, 2001) 包括：

- (1). 相同的觀測精度：前後期觀測精度應具統計性相等，再進行比較才有意義，可採 F 檢驗測試。
- (2). 相同的基準：確認起算基準區域之穩定性，避免因基準系統性差異誤判為下陷量的變化。
- (3). 安排相同條件的觀測程序：前後期影響量相同，經由高程相減仍獲得正確下陷量
- (4). 重複監測頻率需求：監測頻率、觀測精度與下陷量規模有關。

為求不同時期有相同的比較基準，本研究擬採用區域適中 (大區域可分割成小區域計算，例如 5m×5m)、精度高、坡度變化小及穩定不易變化區域的人造平坦面作為監測面，以其點雲擬合平面中心高程來進行不同時期地層下陷的比對。其進行方式說明如下：

### 1. 測區網格化

依據本研究規劃中的光達密度約為 4.5 點/m<sup>2</sup>，在 5m×

5m=25m<sup>2</sup> 大小面積內平均將有 25×4.5=112 點的點雲資料，觀測點數達 100 點以上，符合多個光達點取代單一光達點的構想。最後再統計高程差異，並以選定之門檻值加以測試，調整至合理範圍，以期達到最適監測面的選定。試驗區內所劃分網格，將供後續分析其屬性（即平面坡度及平均反射強度）是否符合監測之所需。

#### 2. 求網格中心高程

將網格區域內所有原始光達點雲以最小二乘法進行平面擬合後，求出擬合之平面方程式係數，並取其擬合平面之中心高程來代表網格中心高程。

#### 3. 限制擬合平面坡度

由於光達平面精度較高程精度差，一般經驗空載光達高程精度達 15 公分時，平面精度約在 50 公分左右。如監測面不夠平坦，平面的誤差將會影響高程的大小，因此將配合兩不同時期空載光達掃描之內部精度，規劃地表監測面的坡度亦即平面傾斜角度控制在 5 度以內，可使點雲因平面誤差而造成的高程誤差保持在 4.6 公分以內（ $0.5 \text{ m} \times \tan 5^\circ \approx 0.046 \text{ m}$ ）。

#### 4. 限制擬合平面精度

配合兩不同時期空載光達掃描之內部精度成果，以擬合平面精度小於某一臨界值再將其視為平坦之監測面，本研究試驗中將選取內部精度較差之值為臨界值。

### 3.3 非自然地層下陷(變動)數據的過濾

兩不同時期空載光達高程資料之差異性有可能來自於地物變遷，因此在進一步分析地層下陷的變化量之前必須先將地物變遷的部份排除在外，才能達到真正分析地層下陷量的目標。本試驗的構想如下：

1. 統計高程差過濾異常數據：依實驗區最近兩年最大地層下陷量 11.6 公分的特性，統計不同時期數據差異的分布情況，將差異過大(例如信賴區間 95%以外)的數據加以剔除。
2. 以地物反射強度及監測面坡度差異進行過濾：監測工作進行時需以相同的固定物來觀察其不同時期的變化，Song et al. (2002)研究認為雖然 LIDAR 實際的反射強度和物質理論上的反射係數並不一致，但還是會有相對大小的反射強度可供區別。Matikainen et al. (2003)則認為建物與樹木的反射強度值有明顯的差異。因此可將監測面在兩不同時期的平均反射強度和平面坡度進一步約制排除地物變遷植被覆蓋區，以萃取出道路、屋頂、運動場、混凝土等平坦穩固之監測面，同時排除農業耕作區等不適用於監測的區域。

#### (1)、以反射強度進行過濾

- (a)、同時期反射係數之差異：將所有網格內之原始點雲平均強度值與測區航空正射影像套繪後並

觀察紀錄柏油道路強度值，以及屋頂、運動場、混凝土、人工草皮面等人工結構物強度值，並以網格內平均反射強度的相對大小來區別不同屬性的監測面，提高穩固監測面萃取的正確率。

- (b)、不同時期反射強度之差異：由於測區包含大區域的農耕區，農耕地屬不穩定之監測面，會因不同時間而呈現不同的面貌，例如剛插秧和收割前後的水稻田有可能會呈現不同的反射強度，本研究將嘗試以前後兩年監測面平均強度值的差異大小來排除變化較大的農耕區。

- (2)、以坡度差異進行過濾

若兩不同時期穩定監測面的空間平面方程式分別以式(1)、(2)表示

$$Z = a_1X + b_1Y + c_1 \quad (1)$$

$$Z = a_2X + b_2Y + c_2 \quad (2)$$

其中 $(X, Y, Z)$ 為點坐標， $a_i, b_i, c_i, i=1 \sim 2$ 平面方程式之係數

則當兩不同時期的空間平面是穩固不變

時，理論上 $a_1/b_1$ 和 $a_2/b_2$ 的比值(可代表坡度大小之變化)應該為1，但考慮各種誤差的影響，其比值即使不為1也應趨近於1，且二平面的空間夾角也不應太大，本研究於萃取監測面時，將嘗試以前後兩不同時期同一空間平面的坡度差異大小和平面夾角差異大小來萃取穩固的監測面。

### 3.4 正確的大地起伏模式

由於空載光達測量產出的點雲高程是WGS84坐標系統的橢球高，但一般點高程資料是以基隆平均海面為基準的正高系統，因此兩不同高程系統之轉換牽涉到正確的大地起伏模式轉換(呂誌強, 2004)。但亦有如許海龍(2007)於雲林地層下陷地區地形變遷調查研究中，以測區內選定均勻分布的20個已知控制點佈設 $1.2m \times 1.2m$ 的板標，並以(1)反射強度值、(2)周遭點位高程差異、及(3)點位間最遠距離小於 $1.2m$ 的三個條件，辨識出落在板標上的點雲資料後，繼而將雷射點雲高程成果與已知點位高程作比對，建立高程修正模式。但因本次試驗區每年地層下陷量不大，且人工板標測定水準高程亦需要較高的人力成本，為節省成本並減少大地起伏改正的干擾，擬直接以不同時期的且透過實測控制點橢球高約制改正之WGS84點雲成果來比較橢球高的變化。

## 四、研究成果

本研究空載光達實驗區的選定，係以台灣西部沿海區域，地勢低

窪坡降平緩，且受地層下陷影響，普遍存在排水不良問題的雲林縣為主，實驗區橫跨下陷速率較大的雲林縣長鄉、土庫鄉(年平均地層下陷速率請參考圖 3)，其西南角坐標約為

(2618900m, 178800m)、東北角坐標約為(2620900m, 188800m)，長為 10 公里、寬 2 公里的範圍(如圖 4 粉紅色框位置)。

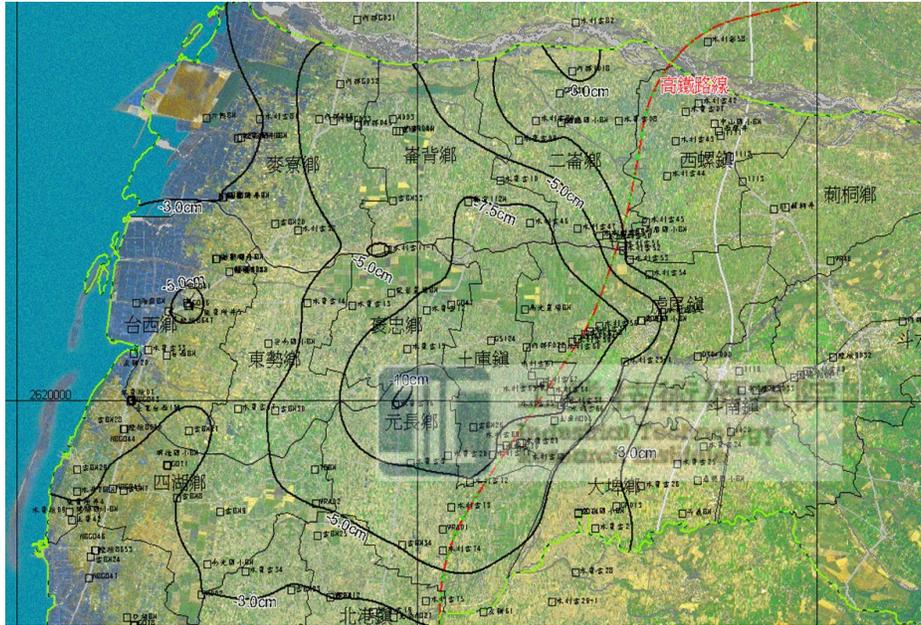


圖3 實驗區年平均地層下陷速率圖 (經濟部水利署, 2008)

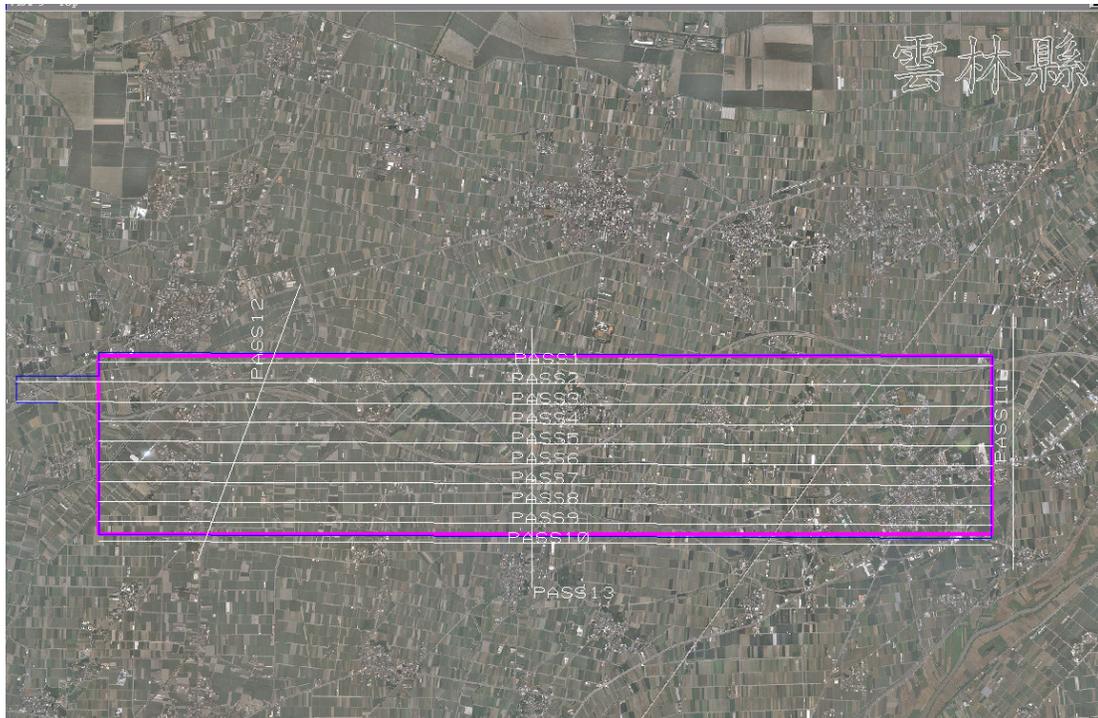


圖 4 試驗區與掃描航線規劃關係

#### 4.1 點雲資料蒐集與精度檢核

97 年度空載光達資料之掃描時參數之設定如表 3 所示，且地面主站之選用以 96 年水利署雲林地層下陷計

畫中所用之基站 (PA01、PA02) (許海龍，2007)，原則上掃描時之視角 (Field Of View, FOV) 不應過大以獲得良好反射及足夠密度之雷射點。

表 3 空載雷射掃描規劃參數表

參數地點	航線數	離地高 (m)	航高 (m)	航速 (km/h)	掃描角度 (deg.)	雷射脈衝率 (KHz)	掃描頻率 (Hz)	掃描帶寬 (m)	重疊帶寬 (m)
下陷區	11	600	600	154	±15	33	33	322	96(30%)
交叉航線	3	600	600	154	±15	33	33	322	96
總計	14								

經 97.3.15~16 兩日飛行，其掃描航帶共計東西向 11 條及交叉航線 3 條 (如圖 5)。利用 TerraScan 自動濾除及必要人工編輯後，可分類地面點及非地面點，由於資料量相當大，故利用 1/2500 圖幅範圍進行切割貯存

(如圖 6，其中紅點為非地面點、橘點為地面點)，此 1/2500 圖幅經處理為各重疊 5 公尺之正交網格。而圖 7 乃利用橘色地面點內差所得之一公尺規則網格之 DEM。

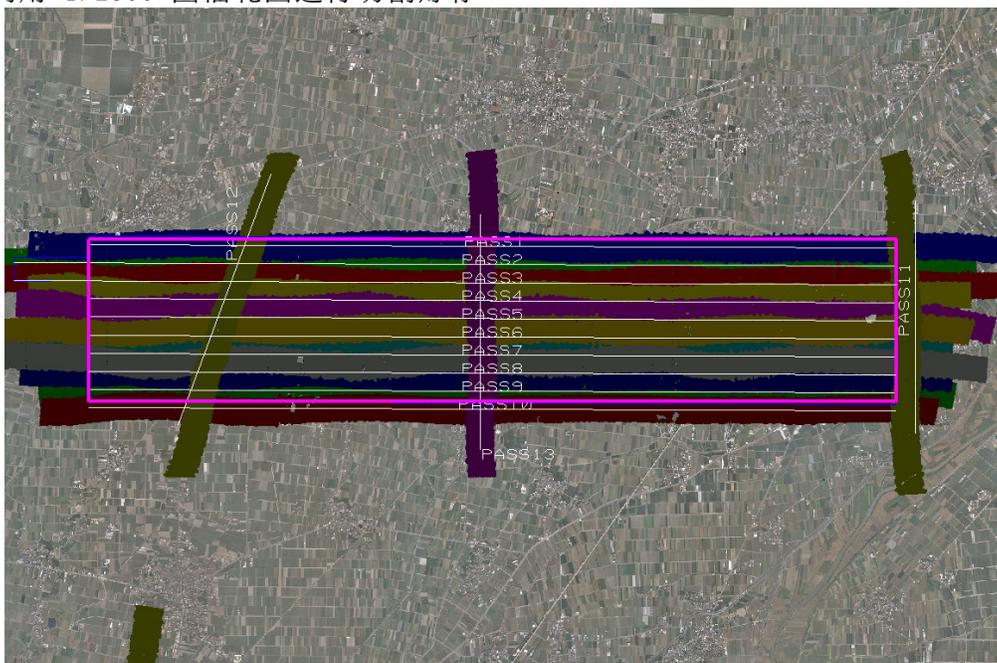


圖 5 掃描航線成果圖

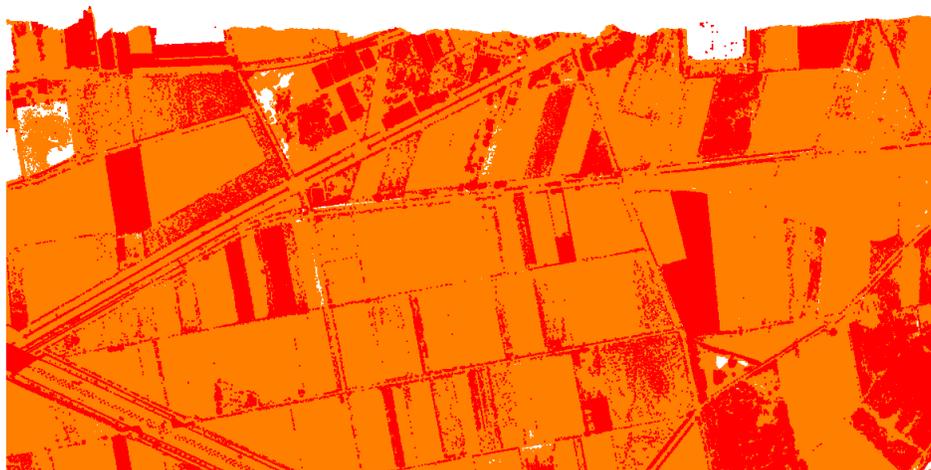


圖 6 以 1/2500 圖幅為範圍之分類點雲資料例(此圖號 94202022-1)

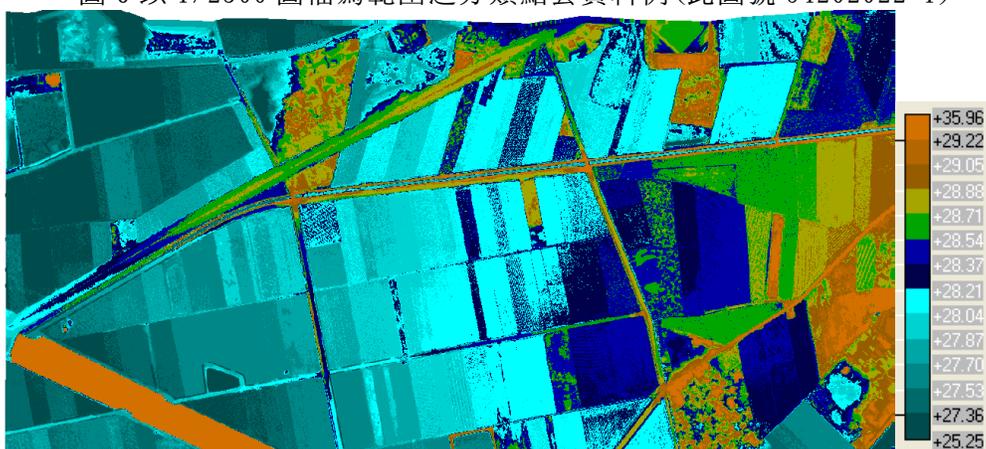


圖 7 一公尺網格 DEM 成果範例(此圖號 94202022-1)

此外，本研究於 97 年 4 月 25 日赴現場以 VRS GPS 實地施測 10 個檢核點(圖 8 中編號 P 開頭之點位)，檢核後之成果精度表如表 4。其高程差平均值約 2 公分，檢核精度已可達 5cm

以內，符合當初設計，亦即以年下陷量達 11.6 公分的地區，觀測頻率每年施測一次，觀測精度至少需達 5.8 公分(2 倍  $\sigma$  < 11.6 公分)之設計目標。

表 4 檢核成果精度表(高程系統：TWD97 橢球高、平面系統：TWD97、單位:公尺)

點號	橫坐標	縱坐標	VRS GPS橢球高	點雲資料內插所得高程	高程差量
P002	187628.712	2620192.374	36.558	36.596	0.038
P004	186817.442	2620753.268	36.894	36.819	-0.075
P005	186798.575	2618760.414	37.341	37.381	0.040
P007	186440.987	2619656.473	35.509	35.521	0.012
P009	184704.657	2620909.960	33.653	33.673	0.020

P010	185315.787	2619108.996	34.039	34.133	0.094
P012	183843.415	2619559.521	33.591	33.632	0.041
P014	183126.508	2620810.028	32.298	32.329	0.031
P018	180990.747	2620783.311	30.630	30.632	0.002
P021	180795.144	2618685.710	30.216	30.234	0.018
				高程差平均值	0.022
				高程差最小值	-0.075
				高程差最大值	0.094
				高程差標準偏差	0.042

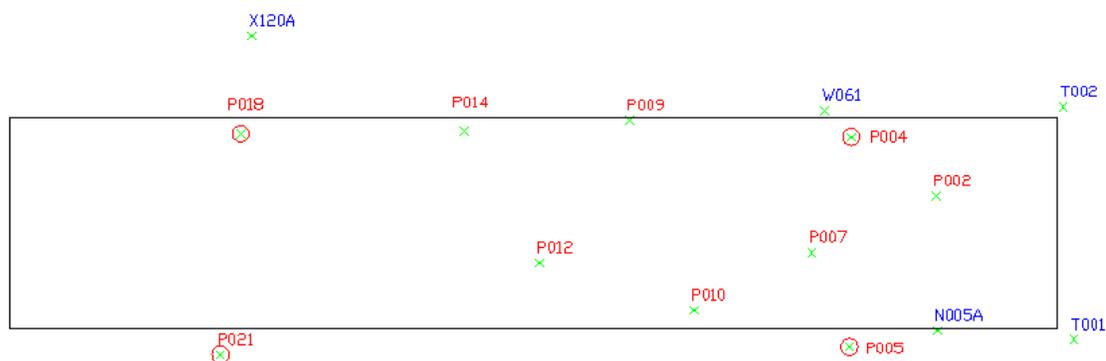


圖 8 實測檢核點分布圖

接下來進行加入地面已知控制點進行約制改正點雲高程：即於測試區選定高程約制控制點，比較該點上內插雷射點之高程較差值，建立橢球高程修正模式，再利用此模式進行全區雷射點之高程修正。

如表 6 即以圖 8 中 P004、P005、P018、P021 四點為高程約制點，計算

實測橢球高和以點雲資料內插所得高程之差量(如表 5 所示)，以此差量為基準並利用雙線性內插計算圖 8 中其餘 6 個檢核點所需改正之高程改正量(如表 6)，而改正後與實測橢球高之關係亦顯示於表 6 中。顯示其高程平均差異量為 0.059m，而高程 RMSE 為 0.023m。

表 5 P004、P005、P018、P021 實測 VRS GPS 橢球高和點雲高程之差異表(單位:m)

點號	橫坐標	縱坐標	VRS GPS 橢球高	點雲資料內插所得高程	高程差異
P004	186817.442	2620753.268	36.894	36.819	0.075
P005	186798.575	2618760.414	37.341	37.381	-0.040
P018	180990.747	2620783.311	30.630	30.632	-0.002
P021	180795.144	2618685.710	30.216	30.234	-0.018

表 6 以 P004、P005、P018、P021 四點實測橢球高作為高程約制並進行點雲高程雙線性內插改正後與實測橢球高之關係表(單位:m)

點號	E	N	H	原點雲高	雙線性內插改正量	改正點雲高	差值
P002	187628.712	2620192.374	36.558	36.596	0.049	36.645	0.087
P007	186440.987	2619656.473	35.509	35.521	0.010	35.531	0.022
P009	184704.657	2620909.960	33.653	33.673	0.053	33.726	0.073
P010	185315.787	2619108.996	34.039	34.133	-0.019	34.114	0.075
P012	183843.415	2619559.521	33.591	33.632	-0.003	33.629	0.038
P014	183126.508	2620810.028	32.298	32.329	0.028	32.357	0.059
						差值均值	0.059
						RMSE	0.023

由於僅有 6 點檢核點，因此將位於試驗區之特殊設計之板標所測之 VRS GPS 高程加入後選取約制點進行改正量計算，並計算其餘檢核點經雙線性內插改正後之高程。如圖 8 中所示，其中板標 W061 無點雲資料，T002 高程差異較大捨去不用，而 X120A 雖遠離測區，但因在交叉航帶上，所以板標上有點雲資料。以類似表 6 中之

測試，以 P004、T001、P018、P021 四點高程控制點進行高程約制後，計算實測橢球高和以點雲資料內插所得高程之差量(如表 7 所示)，以此差量為基準並同樣以雙線性內插方式計算 9 個檢核點所需改正之改正量(如表 8)，而改正後與實測橢球高之關係亦顯示於表 8 中。顯示其高程平均差異量為 0.029m，而高程 RMSE 為 0.044m。

表 7 P004、T001、P18、P021 實測 VRS GPS 橢球高和點雲高程之差異表(單位:m)

點號	橫坐標	縱坐標	VRS GPS 橢球高	點雲資料內插所得高程	高程差異
P004	186817.442	2620753.268	36.894	36.819	0.075
T001	188939.584	2618829.319	39.932	40.060	-0.128
P018	180990.747	2620783.311	30.630	30.632	-0.002
P021	180795.144	2618685.710	30.216	30.234	-0.018

表 8 以 P004、T001、P18、P021 四點實測 VRS GPS 橢球高作為高程約制點並進行點雲高程雙線性內插改正後與實測橢球高之關係表(單位:m)

點號	E	N	H	原點雲高	雙線性內插改正量	改正點雲高	差值
P002	187628.712	2620192.374	36.558	36.596	0.029	36.625	0.067
P007	186440.987	2619656.473	35.509	35.521	-0.023	35.498	-0.011
P009	184704.657	2620909.960	33.653	33.673	0.057	33.730	0.077
P010	185315.787	2619108.996	34.039	34.133	-0.059	34.074	0.035
P012	183843.415	2619559.521	33.591	33.632	-0.023	33.609	0.018
P014	183126.508	2620810.028	32.298	32.329	0.028	32.357	0.059
P005	186798.575	2618760.414	37.341	37.381	-0.105	37.276	-0.065
N005A	187637.957	2618913.811	37.163	37.274	-0.102	37.172	0.009
X120A	181095.216	2621712.470	32.636	32.700	0.009	32.709	0.073
						差值均值	0.029
						RMSE	0.044

由表 6 和表 8 顯示經特定高程點約制之後，其高程檢核之 RMSE 約在 5 公分之內，因此對後續進行地層下陷量計算有其助益。

#### 4.2 監測面萃取

由於所蒐集之 96 年光達資料係擷取經濟部水利署 96 年「雲林地層下陷地區地形變遷調查研究」59 條航帶中之部份掃描資料，其中並無實測控制點之橢球高可作為高程控制約制改正所有點雲高程資料，因此以下實驗先針對第三節所描述之因素進行監測面萃取之比較分析，試驗中除使用上述 96 年度光達資料，亦使用 97 年度所規劃設計掃描之資料外，而 97 年空載光達測量成果其航帶平差所使用之共軛面(Tie Surface)其高程精度(內

部精度)為 3.0 公分，96 年高程精度(內部精度)為 4.6 公分。

此外，本實驗區屬農業耕作區域，其中 78 號東西快速道路橫貫經過，高速鐵路位於東側並由東北往西南方穿越，區內分佈少數小型村鎮而無大型城市，因此在遮蔽物少且地勢平坦的現況條件下，有利空載光達的作業。但由於農業耕作區內的地表將因耕作而有所變動，此將不利於穩固監測面的選定。

而 96、97 年平均反射強度(詳表 9)分布不同，本研究僅將 96 年所有點雲平均反射強度乘以 0.6 簡單改正至與 97 年平均反射強度一致，以供後續反射強度比對之用。

表 9、96、97 年兩不同時期空載光達測量之飛航參數及相關統計資料

飛航日期	96.2.4	97.3.16
航線數(條)	59	13
離地高(公尺)	600	600
航速(公里/時)	166	154
掃瞄角度(度)	±15	±15
雷射脈衝率(千赫茲)	50	33
掃描頻率(千赫茲)	43	33
掃描帶寬(公尺)	322	322
航帶重疊(%)	30	30
雷射點密度(點/平方公尺)	6.4	3.4
內部精度(公分)	4.6	3.0
地面主站(名稱)	PA01 PA02	PA01 PA02
有效網格數(個)	799,503	797,094
平均高程(公尺)	33.56	33.39
平均反射強度	14.4	8.6

目前監測面以每一網格面內含 100 個光達點為原則，配合 96、97 年空載光達掃描密度(詳表 9)，將測區劃分為 5 米見方大小的 80 萬個網格(監測面)，供後續分析其屬性(即平面坡度及平均反射強度)是否符合監測之所需。

監測面選取除了以 5 米見方網格考慮其坡度及擬合平面精度之外；另外就是除上述條件外，再加上擬合平面的坡度差異及平均反射強度差異約制，茲將監測面選取結果說明如下：

將測區劃分為 5 米見方網格，且網格擬合平面坡度在 5 度以內，擬合

平面精度在 4.6 公分以內，共可過濾出 103,370 個網格面，平均高程差為 -13.5 公分。由於高程差含有一些較大的異常數據(可能為填土區或開挖區)，導致高程差分佈的統計圖範圍有過大的情況(如圖 8)，因此取 95%的信賴區間排除異常數據之干擾，以 2.5%

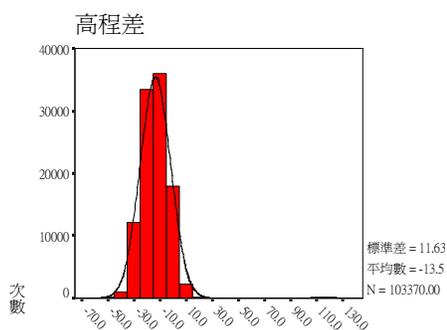


圖 8 不考慮是否為穩固監測面  
高程差異統計

接下來，由 98,186 個網格面，限制擬合平面前後兩年之 a、b 的係數比(即坡度差異約制)在 80%~120%之間(差異在 20%之內)，二空間平面夾角差異在 2 度以內，前後兩年之平均反射強度差異在 20%以內，萃取監測面，並套繪於正射影像上以人工判定監測

及 97.5%的位數 -32.1 公分及 5.0 公分為高程差過濾範圍，可得新的高程差分佈情況(如圖 9)，共計有 98,186 個網格面，經統計高程差平均值為 -13.8 公分(換算年平均高程差為 -12.4 公分)。

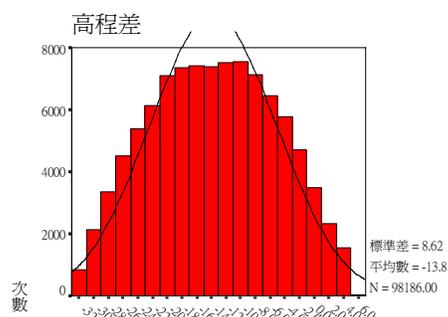


圖 9 95%信賴區間的高程差異統計

面是否為穩固面，此為萃取法 1，其結果詳見表 10。如再將萃取時將平均反射強度區分為 5~8(柏油路面)及 14~18(道路、屋頂、運動場、混凝土、人工草皮面)二種時，由其組合得萃取法 2、3、4，萃取結果詳見表 10。

表 10、不同條件監測面萃取與計算結果

項目 \ 萃取法	1	2	3	4
擬合平面坡度	5 度以內			
擬合平面精度	4.6 公分以內			
高程差範圍(95%)	-32.1 公分~5.0 公分			
平均反射強度差異	20%以內			
平面係數差異 (坡度差異)	20%以內			
平面夾角差異	2 度以內			
平均反射強度約制	無	5~8	14~18	5~8 & 14~18
自動萃取網格數量	1645 個	552 個	120 個	672 個
經人工辨識為穩固網格面之數量	1036 個	427 個	107 個	534 個
正確率(穩固/萃取)	63%	77%	89%	80%
穩固網格面分佈圖	圖 10	—	—	圖 11

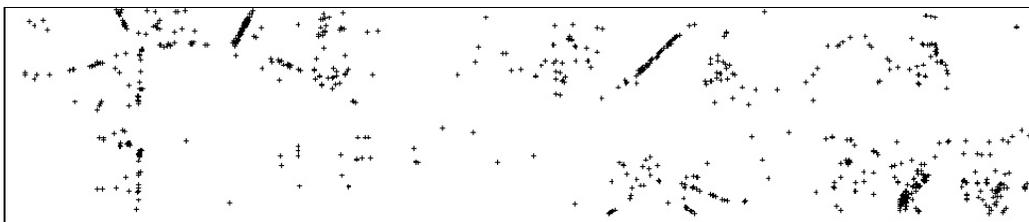


圖 10、萃取法 1 穩固網格面分佈情況

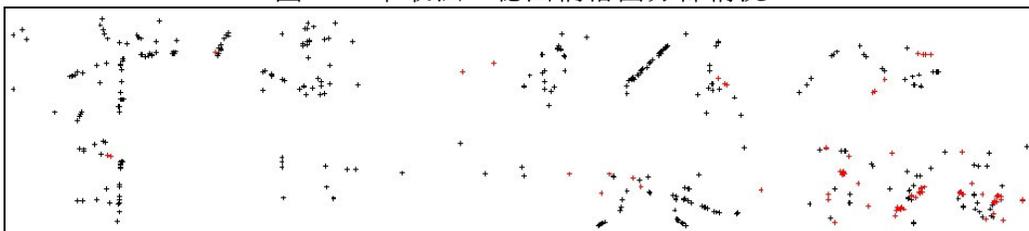


圖 11、萃取法 4 穩固網格面分佈情況

### 4.3 成果分析

以下分析皆以全區高程差 95%的信賴區間(即-32.1 公分~5.0 公分之間)來排除少數高程差異異常的數據。

1. 在只考慮網格擬合面之坡度與精度時，萃取出 98,186 個網格面。由於本法萃取數量多，並未以人工辨識方式統計穩固監測面正確萃取的百分比。
2. 萃取時加上擬合平面坡度與夾角約制以及平均反射強度差異約制時(萃取法 1)，可萃取出正確率為 63% 的穩固網格監測面。
3. 萃取時針對反射強度分類出的 5~8(柏油路面)及 14~18(道路、屋頂、運動場、混凝土、人工草皮面)兩種地物(萃取法 4)，可提高穩固網格監測面萃取正確率至 80%。
4. 引用之 96 年成果其正高檢核之外部精度雖可達 3.5 公分，但卻缺少 WGS84 橢球高的外部精度，因此本研究為配合 96 年成果，96、97 年均以內部精度來計算相關的萃取參數，實驗結果顯示，因不同精度大小訂出的萃取參數雖會影響監測面

的萃取數量，但對穩固監測面的正確率影響並不大。

5. 測區內的高速鐵路於本研究中並未萃取出任何可用之監測面，究其原因係高鐵高架橋面寬僅約 13 米，除兩側翼牆妨礙光達的掃描外，橋面上的道板、道渣與兩側電纜人行道高度均不同，導致無法萃取出 5 米見方的平坦監測面，如需以空載光達測量對高鐵進行監測，可能需要更小的監測面來進行分析。

### 五、結論

空載光達測量具備快速、不受天候影響的特性，且此技術日益精進成熟，若能運用於地層下陷工作中的地表監測，不但可節省大量的人力及經費，且可以全面性地提供地層下陷資料進行更完整的研究與分析。本文中提出空載光達測量技術進行監測地層下陷面臨的四個關鍵技術，亦即：(一)、光達點雲精度是否足以判斷地層的下陷量。(二)、如何以點雲資料來比對不同時期的高程。(三)、非自然地層下陷(變動)數據的過濾。(四)、正確的大地起伏模式。並對此

四個關鍵技術加以分析和探討，其中除初步確定應用於地層下陷的空載光達資料掃描作業方式，並進行精度評估，由所評估之精度中說明以 VRS GPS 實測地面橢球高進行高程約制改正之空載光達資料其高程精度已可達 5 公分之內，對後續進行地層下陷量計算有其助益。然而，由於本試驗所取得 96 年度空載光達資料並無實測地面橢球高程可以進行高程約制改正，因此本文先行探討兩不同時期之空載光達資料萃取穩定監測面之方式，由試驗中說明其萃取正確率已可達 80%，這對進行監測工作有相當助益。

後續研究中將以所確認之掃描作業方式繼續蒐集不同年度之空載光達資料並同時施測主站以外之 GPS 高程點來約制進行全區點雲的橢球高改正，取得具實測地面橢球高程約制改正之另一年度空載光達資料後，再將其與 97 年度橢球高程約制改正後之光達點雲資料進行穩定監測面萃取並計算地層下陷量，以進行詳細之分析。此外，本文中僅以空載光達資料所擬合平面之幾何及反射強度限制，進行可能變遷地區範圍之過濾，將來擬透過其他輔助資料過濾並萃取堅固監測面，如融合地形圖建物區或道路區資料萃取堅固之監測面、或搭配近紅外光航空影像，利用植生指數 (NDVI) 來排除摘種農作物的農耕區等方式，期能萃取更正確的穩固監測面，提高地表監測工作的準確率。而由於經費受限，橢球高程約制改正僅使用 VRS GPS 方式進行測量，此約制方式是否恰當，亦有待進一步探討。

### 致謝

本研究感謝經濟部水利署提供

96 年空載光達資料，並承蒙行政院國家科學委員會支持之研究計畫 (NSC 96-2625-Z-004-002) 經費支援，特此致謝。

### 參考文獻

1. 王志添、王顯達、陳滌清、陳乃宇、梁隆鑫，2001，「雷達差分干涉法應用於地層下陷研究」。航測及遙測學刊，第六卷，第一期，第 283-295 頁，民國 90 年 3 月。
2. 史天元、彭森祥，2003，「空載雷射掃描數據精度評估程序之研究」，第二十一屆測量學術及應用研討會論文集，247-256。
3. 呂誌強，2004，「DEM 解析度對大地起伏模式之影響」，國立交通大學土木工程學系，碩士論文：新竹。
4. 洪偉嘉、柳志錫、黃鎮臺、劉進金，2006，應用 GPS 監測地層下陷。website: <http://www.subsidence.org.tw/> 更新日期 Oct 01 2006；取用日期 2006 年 12 月 12 日。
5. 柳志錫、譚凱英，2006，「地層下陷之監測方法」。 <http://www.subsidence.org.tw/>，取用日期 2008 年 02 月 18 日。
6. 高玉惠、黃偉城、林東裕，2005，「GPS 動態軌跡解算於空載 LIDAR 點雲成果精度之探討」，內政部『辦理 LIDAR 測區之高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案』成果發表暨應用研討會，247-255。
7. 許海龍，2007，「雲林地層下陷地區地形變遷調查研究」，台北市/經濟部水利署。

8. 陳大科、石佳惠、施萍芬、王成機，2005，「空載光達資料航帶平差之精度探討」，第 24 屆測量學術及應用研討會，123-131。
9. 陳志芳、賴聖耀，1994，港灣地區地層下陷監測研究，交通部運輸研究所，中華民國九十三年四月。
10. 彭森祥、史天元、楊名、劉進金，2001，「雲林地層下陷高程監測」。第二十屆測量學術及應用研討會，論文編號 B1，337-344。
11. 經濟部水利署，2006，「高鐵雲林沿線地層下陷及行車安全」。http://www.wra.gov.tw/ct.asp?xItem=26091&ctNode=5281&comefrom=lp，取用日期：2008 年 02 月 18 日。
12. 經濟部水利署，2007，「地層下陷資料管理系統」。http://www.subsidence.org.tw/，取用日期：2008 年 02 月 18 日。
13. 劉榮寬、徐偉城、史天元、劉進金，「空載光達系統率定初探」，第 24 屆測量學術及應用研討會，447-456。
14. 劉進金，2005，「空載光達技術之發展現況空載光達技術之發展現況」，「國內高解析空載及衛載遙測之現況及未來」研討會，93 年 10 月 8 日。行政院農業委員會及國立中央大學太空及遙測研究中心共同主辦。
15. 謝嘉聲、史天元，2006，以雷達干涉技術偵測地表變形之研究。website: http://www.subsidence.org.tw/ 更新日期 Oct 01 2006；取用日期 2006 年 12 月 12 日。
16. Ackermann, F. 1999, *Airborne laser scanning - present status and future expectations*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 54.
17. Crombaghs, M.J.E., Brugelmann, 2000, *On the adjustment of overlapping strips of laser altimeter height data*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B3, 230-237.
18. Elberink, Oude, S., Brand, G., Brugelmann, R., 2003, *Quality improvement of laser altimetry DEM's*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 34, part 3/W13, proceedings of the ISPRS workshop III/3 "3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data", Germany: Dresden: 51-58.
19. Habib, Ayman Fawzy, Rita Wai Ting Cheng, Eui-Myoung Kim, Edson Aparecido Mitishita, Richard Frayne, and Janet Lenore Ronsky, 2006, *Automatic Surface Matching for the Registration of LIDAR Data and MR Imagery*, Electronics and Telecommunications Research Institute Journal, vol.28, no.2:162-174.
20. Latypov, D., 2002, *Estimating relative LIDAR accuracy information from overlapping flight lines*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 56 (2002) (4):236-245.

21. Lohr, U., A. Hellmeier, L. Barruncho, 2004, *Precise LIDAR data - an efficient way to build up virtual 3D city models*, Proceedings of the International Workshop on Vision Technologies Applied to the Rehabilitation of City Centres, Lisbon, Portugal, [http://lusiglob.edinfor.logicacmg.com/portal/docs/Lisbon\\_LHB\\_2004.pdf](http://lusiglob.edinfor.logicacmg.com/portal/docs/Lisbon_LHB_2004.pdf).
22. Maas, H.G., 2002. *Methods for measuring height and planimetry discrepancies in airborne laserscanner data*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68, 933-940.
23. Matikainen, L., Hyypä, J., and Hyypä, H., 2003. *Automatic detection of buildings from laser scanner data for map updating*. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 3/W13, 218-224.
24. Maune, David F., 2001, *Digital Elevation Model Technologies and Application : The DEM User Manual*, ASPRS, 431~434.
25. Morin, Kristian Walker, 2002 , *Calibration of Airborne Laser Scanners*, UCGE Report Number 20179.
26. Renslow M., 2001, *Development of A Bare Ground DEM and Canopy Layer In NW Forestlands Using High Performance LIDAR*, ESRI international user conference.
27. Song, J.-H., Han, S.-H., Yu, K., and Kim, Y.-I., 2002, *Assessing the possibility of land-cover classification using LIDAR intensity data*. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 3B, 259-262.
28. Tao, Guo and Yoshifumi Yasuoka, 2004, *Combining high-resolution satellite imagery and airborne laser scanning data for generating bareland DEM in urban areas*, Proceedings mote Sensing and Spatial Information Science, Kunming, China, 26-28.