

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

多時序三維空間資訊於地層下陷監測及分析--子計畫:以空
載光達技術進行地層下陷監測之研究(III)
研究成果報告(完整版)

計畫類別：整合型
計畫編號：NSC 98-2625-M-004-001-
執行期間：98年08月01日至99年10月31日
執行單位：國立政治大學地政學系

計畫主持人：邱式鴻

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：謝幸宜

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 100 年 01 月 17 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

多時序三維空間資訊於地層下陷監測及分析—子計畫二：

以空載光達技術進行地層下陷監測之研究(III)

Land Subsidence Monitoring Using Airborne Lidar Surveying Technique

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 98—2625—M—004—001—

執行期間：98年08月01日至99年10月31日

計畫主持人：邱式鴻

計畫參與人員：謝幸宜、吳志文、張 瑋

成果報告類型(依規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立政治大學 地政學系

中華民國 九十九年 十月 卅一日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

以空載光達技術進行地層下陷監測之研究(III)

Land Subsidence Monitoring Using Airborne Lidar Surveying Technique

計畫編號：NSC 98-2625-M-004 -001 -

執行期限：98 年 8 月 1 日至 99 年 10 月 31 日

主持人：邱式鴻* 政治大學 地政學系副教授

共同研究員：謝幸宜 國立政治大學碩士生

共同研究員：吳志文 國立政治大學學士班學生

共同研究員：張 瑋 國立政治大學學士班學生

*地址：台北市指南路二段 64 號國立政治大學地政學系

*E-mail: chio0119@nccu.edu.tw

摘 要

地層下陷是台灣西南部地區一個相當嚴重的問題，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，本計畫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。本報告是三年期計畫中的第三年之計畫成果，本年度研究重點在於以經濟部水利署於 2007 年與本子計畫於計畫執行第一年所蒐集之 2008 年空載光達資料以及第三年所蒐集之 2010 年空載光達資料，利用本子計畫前兩年所建構地層下陷量分析模式進行實驗。

本子計畫前兩年所建構地層下陷量分析模式係首先將監測區內掃描的光達點雲資料進行網格化分群；接著，以網格區域內光達點計算平面擬合參數以及區域中心高程；然後，以人工或自動方法萃取出平坦、穩固的網格區域做為監測面；最後，以區域中心高程計算高差並進行不同時期網格監測面高程差異之統計測試分析，以求出地層下陷量。實驗根據網格監測面的精度、坡度、坡向、反射強度、以及先驗下陷量等設定萃取出穩固監測面，最佳成果可萃取出約 80% 正確率的穩固監測面，且其所計算之年平均下陷量與測區內 2007 年、2008 年及 2010 年經濟部水利署雲林地區的 9 個水準點高差所計算之年平均下陷量相差約 2.1~2.4 cm，但其平均下陷速率的趨勢一致，由此成果可說明本研究對建立一套省時省力的監測模式，進而達到地層下陷監測自動化有相當助益，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、監測。

Abstract

Land subsidence along the southwestern area in Taiwan is a serious problem. Traditional precise leveling surveying and GPS surveying techniques have been implemented for land subsidence monitoring. However, these two surveying techniques are time-consuming. In addition, those collected point-scattering or profile-scattering data cannot provide the global data for comprehensive analysis. Therefore, this study will 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 acquire dense and accurate points clouds rapidly.

Because of the above-mentioned characteristics, airborne LIDAR data has great potential to provide global data for land subsidence in short time. This study presented the results of the last year. The objective of this study in the last year is to test the algorithm for land subsidence analysis developed in the first two year by using the airborne LIDAR data acquired in 2007, 2008, and 2010. The calculated average subsidence rate will be verified by annual subsidence amount collected by leveling surveying in 2007, 2008 and 2010. The proposed algorithm for land subsidence analysis is first to divide the collecting point clouds in the monitor area into regular grids. Secondly, all the points in the regular grids are fitted to one set planar parameters by least squares principle and the centric elevation of each grid is calculated. Third, the flatness and well-defined planar grids are selected as the monitoring surfaces with the manual or automatic method. Finally, the difference of centric elevation in each monitoring surfaces at different period is calculated and analyzed with statistical approach. This study shows that our approach can extract stable monitoring surfaces by limiting planar fitting accuracy, flatness, slope, intensity, and by prior amount of land subsidence. The extracted correct rate is about 80%. The discrepancy of elevation difference between this study and long-term monitoring result is between 2.1 and 2.4 cm. It proves that the proposed approach is helpful on constructing the automatic method for land subsidence monitoring in the future.

Keywords: Land subsidence, LIDAR, monitoring.

目 錄

| | |
|---------------------------|-----|
| 摘 要..... | I |
| Abstract..... | II |
| 目 錄..... | III |
| 表目錄..... | IV |
| 圖目錄..... | I |
| 一、前言與研究目的..... | 1 |
| 二、文獻回顧與分析..... | 1 |
| 三、主要研究流程與研究方法..... | 3 |
| 3.1 點雲網格化..... | 4 |
| 3.2 擬合面計算..... | 4 |
| 3.3 監測面的萃取..... | 5 |
| 3.3.1 擬合平面坡度..... | 5 |
| 3.3.2 擬合平面精度..... | 5 |
| 3.3.3 反射強度..... | 5 |
| 3.3.4 坡向與坡度差異..... | 6 |
| 3.4 下陷量成果..... | 6 |
| 3.5 下陷量檢核..... | 6 |
| 四、主要研究成果..... | 6 |
| 4.1 點雲網格化..... | 7 |
| 4.2 擬合平面計算..... | 8 |
| 4.3 監測面的萃取..... | 8 |
| 4.3.1 擬合平面坡度..... | 9 |
| 4.3.2 擬合平面精度..... | 9 |
| 4.3.3 反射強度..... | 9 |
| 4.3.4 坡向與坡度差異..... | 11 |
| 4.3.5 萃取門檻值..... | 11 |
| 4.4 下陷量成果..... | 11 |
| 五、結論..... | 15 |
| 六、致謝..... | 16 |
| 七、參考文獻..... | 16 |
| 八、國科會補助專題研究計畫成果報告自評表..... | 19 |
| 附件一 研討會論文..... | 20 |

表目錄

| | | |
|-------|---|----|
| 表 4-1 | 不同時期空載光達測量之飛航參數及相關統計資料 | 7 |
| 表 4-2 | 2007~2010 年間不同條件監測面萃取與計算結果(水利署：-6.9cm)..... | 12 |
| 表 4-3 | 2007~2010 年間不同條件監測面萃取與計算結果(水利署：-6.2cm)..... | 14 |

圖目錄

| | | |
|--------|---|----|
| 圖 2-1 | 空載光達的測量原理圖示(Renslow, 2001)..... | 3 |
| 圖 3-1 | 計畫研究流程圖 | 4 |
| 圖 4-1 | 實驗區年平均地層下陷速率圖(經濟部水利署, 2008) | 7 |
| 圖 4-2 | 擬合平面計算畫面 | 8 |
| 圖 4-3 | 監測面萃取程式畫面 | 9 |
| 圖 4-4 | 2007 年反射強度分布圖 | 10 |
| 圖 4-5 | 2008 年反射強度分布圖 | 10 |
| 圖 4-6 | 2007、2008 年反射強度差值統計圖 | 10 |
| 圖 4-7 | 測區航空正射影像圖 | 10 |
| 圖 4-8 | 2007~2010 年間萃取法 1 穩固網格面分佈情況 | 12 |
| 圖 4-9 | 2007~2010 年間萃取法 1 所得年下陷等值圖 | 12 |
| 圖 4-10 | 2007~2010 年間萃取法 4 經人工辨識之穩固網格面分佈情況 | 13 |
| 圖 4-11 | 2007~2010 年間萃取法 4 所得年下陷等值圖 | 13 |
| 圖 4-12 | 2008~2010 年間萃取法 1 經人工辨識之穩固網格面分佈情況 | 14 |
| 圖 4-13 | 2008~2010 年間萃取法 1 穩固網格面分佈情況 | 14 |
| 圖 4-14 | 2008~2010 年間萃取法 4 經人工辨識之穩固網格面分佈情況 | 15 |
| 圖 4-15 | 2008~2010 年間萃取法 4 穩固網格面分佈情況 | 15 |

一、前言與研究目的

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，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；另一主因則是人為因素，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，弱減河海堤保護標準、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。

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，其高程精度達公分級(史天元、彭淼祥，2003；內政部，2005)，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。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。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。倘能透過不需赴現場觀測即可瞭解大面積區域之地層下陷之趨勢及分佈，不但節省成本亦可節省人力與時間，因此本計畫試圖探討並分析以空載光達資料進行地層下陷監測的可行性。

空載光達(LIDAR)或稱雷射掃瞄儀(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座標，進而達到獲取地物三維空間座標之目的。此技術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、高精度的高程資料。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、文獻回顧與分析

空間技術主要用於地表的監測，除了傳統的精確水準測量之外，還有GPS測高已經實際應用於地層下陷的研究中，如彭淼祥等人(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，水準高程的測量精度達1公分以內；由同一時期兩個完全重複觀測的GPS網比較，內部精度高程達15mm、平面精度達5mm、基線精度達1.6mm。由兩個時期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。實測顯示，應用GPS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調所於該地區以GPS作地面觀測資料比較分析，得到一致之下陷趨勢外，最大下陷速度約為2公分/月，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，經內插處理及座標轉換後，形成雷達座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(Global Positioning System, 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年期間將雷射掃描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描儀系統(Ackermann, 1999)。所以光達測量技術就是使用雷射光束進行掃描式測距之系統(圖2)，其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，導出外部參考座標，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、姿態以及座標之資料，進而可推導出地面之三維座標。

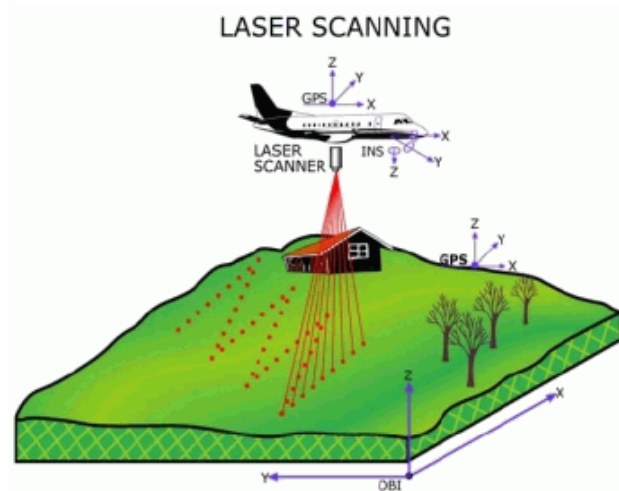


圖 2-1 空載光達的測量原理圖示(Renslow, 2001)

除機動性之外，空載光達測量技術具有下列的特性(劉進金，2005)：

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

本研究引進新科技空載光達測量技術，期待以高度機動性，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，施測相隔特定時間間隔實驗區的地形變化。

空載光達技術機動性強且可以以更高效率，於短時間內獲取大面積且高密度、高精度的高程資料。然光達資料其高程精度雖高，其誤差亦約為10cm，因此是否合適用於地層下陷監測分析，實有待進一步研究，所以本研究主要是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，蒐集實驗區現有的空載光達資料，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。

三、主要研究流程與研究方法

本研究蒐集涵蓋目標區之空載光達資料，分析研究期間內空載光達資料高程之變化以求地層下陷量。本年度為三年期計畫之第三年，研究工作內容包含：(1).蒐集經濟部水利署 2007 年空載光達資料作為第一時期之資料並和本子計畫第一年(2008 年 3 月)和第三年(2010 年 6 月)蒐集到空載光達資料進行地層下陷量分析的計算模式實驗。(2).將地層下陷量和所蒐集的年度下陷量進行分析與探討。(3).撰寫第三年之研究成果報告。(4).發表研討會論文 1 篇。

研究方法係首先將監測區內掃描的光達點雲資料進行網格化分群；接著，計算網格區域內所有光達點擬合平面的中心高程；然後，以人工或自動方法萃取出平坦、穩固的網格區域做為監測面；最後，進行不同時期網格監測面高程差異之統計測試分析，以求出地層下陷量並和所蒐集的年度下陷量進行分析與探討。

研究流程如圖 3-1 所示。

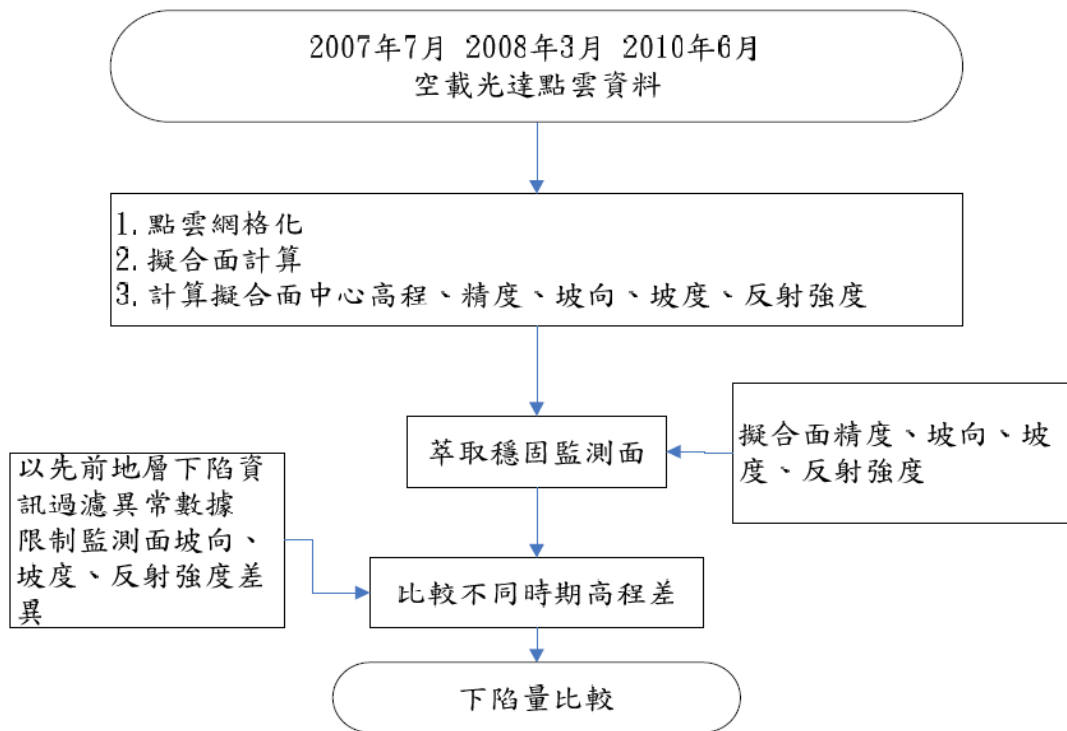


圖 3-1 計畫研究流程圖

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：1.點雲精度是否足以判斷地層下陷量。2.如何比對點雲資料不同時期的高程。3.非自然地層下陷(變動)數據的過濾。4.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已於第一年研究中詳加探討。第二年研究計畫中也以 2007 年空載光達資料和本計畫第一年(2008 年 3 月)蒐集到空載光達資料進行地層下陷量分析的計算模式實驗，得到不錯的成果。今年度重點在於比較長時期的下陷量。

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。2.相同的基準。3.安排相同條件的觀測程序。4.重複監測頻率需求。由於點雲的位置具有隨機性，無法比較不同時期某個固定點位的高程差異，為求不同時期有相同的比較基準，因此參考航帶平差比對共軛面的作法，採用區域適中(大區域可分割成數塊區域計算，例如 5m×5m)、精度高、坡度變化小及穩定不易變化的區域的人造平坦面中心的地形地物面作為監測面，並以監測面內點雲擬合平面中心高程來進行不同時期地層下陷的比對。

本研究進行方式說明如下：

3.1 點雲網格化

依據研究中的光達密度約為 4 點/m²，在 5m×5m=25m² 大小面積內平均將有 100 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。因此試驗中將試驗區劃分為如 5×5m 大小的網格(監測面)，供後續計算後分析其屬性(精度、坡度、坡向及反射強度)是否符合監測之所需。

3.2 擬合面計算

將不同時期網格化的點雲資料，以最小二乘法分別用各網格內之空載光達點雲資料擬合計算其平面係數、擬合面中心高程、擬合面精度及平均反射強度，並以擬合平面之中心高程來代表網格中心高程，供後續監測面萃取之用。

3.3 監測面的萃取

監測地層下陷需在不同時期共同的穩固監測面來觀察其高程變化，本研究以擬合面精度、反射強度及擬合面坡度、坡向等為參數來萃取出不同時期共同的堅固監測面，萃取參數說明如下：

3.3.1 擬合平面坡度

由於空載光達測量平面精度較高程精度差，一般經驗空載光達測量高程精度達 15 公分時，平面精度約在 50 公分左右(Guo and Yasuoka, 1998; Lohr *et al.*, 2004; Habib *et al.*, 2006)。如監測面坡度過大，平面的誤差將會影響高程的大小，因此配合空載光達掃描的內部精度，將平面傾斜角度（坡度）控制，使點雲因平面誤差而造成的高程誤差保持在合理之精度範圍以內。

3.3.2 擬合平面精度

配合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空載光達掃描的內部精度者為平坦之監測面。

3.3.3 反射強度

Song *et al.* (2002) 研究認為雖然空載光達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。因此除了擬合面的精度、坡度外，本研究嘗試以網格內之原始點雲平均反射強度來排除非自然變遷的區域（例如農耕地），以萃取出道路、屋頂、運動場、混凝土等平坦穩固之監測面。

- 1、同時期反射強度之差異：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以人工觀察柏油道路、以及屋頂、運動場、混凝土、人工草皮面等人工結構物強度值範圍，再以上述之平均反射強度的大小來區別不同屬性的監測面，期望提高穩固監測面萃取的正確率。
- 2、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（20%以內）來排除變化較大的農耕區。

3.3.4 坡向與坡度差異

若不同時期穩定監測面的空間平面方程式分別以式 (3.3.4.1)、(3.3.4.2) 表示

$$Z_1 = a_1X + b_1Y + c_1 \quad (3.2.4.1)$$

$$Z_2 = a_2X + b_2Y + c_2 \quad (3.2.4.2)$$

X、Y、Z：點坐標
a₁、a₂：空間平面 X 方向係數
b₁、b₂：空間平面 Y 方向係數
c₁、c₂：空間平面常係數

則當不同時期的空間平面是穩固不變時，理論上 a₁/b₁ 和 a₂/b₂ 的比值（表示坡向之差異）應該為 1，但考慮受到各種誤差的影響，其坡向比值亦應趨近於 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，將以不同時期同一擬合面的坡向差異 20% 以內且擬合面夾角（表示坡度之差異）在 2 度以內來萃取穩固的監測面。

3.4 下陷量成果

研究實驗採四種方式萃取監測面比較不同時期的高程差異，所有方法均以擬合平面精度和坡度先萃取穩定監測面，比較不同時期監測面的高程差異時則再以先驗的地層下陷資料作為約制條件濾除較不合理的下陷量，分析時則再以兩不同時期的監測面坡度差和坡向差、以及反射強度差均限制於一臨界範圍計算其平均下陷量：四種方法之差異則是第一種方法是不限制監測面平均反射強度之範圍；第二、三種方法則是將監測面平均反射強度限制在實驗中所測試出的低與高反射強度，即 5~8 為低反射強度、14~18 為高反射強度；第四法則合併二、三法之資料計算平均下陷量。

3.5 下陷量檢核

地層下陷量的檢核係採用水準點附近的點雲高程及穩固監測面萃取正確率較高的萃取法成果，分別比對經濟部水利署提供 2007 年~2010 年於雲林地區位於實驗區內水準點的沉陷量進行比較。

四、主要研究成果

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元長鄉、土庫鄉(年平均地層下陷速率請參考圖 4-1)，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 4-1 黑色框位置)。

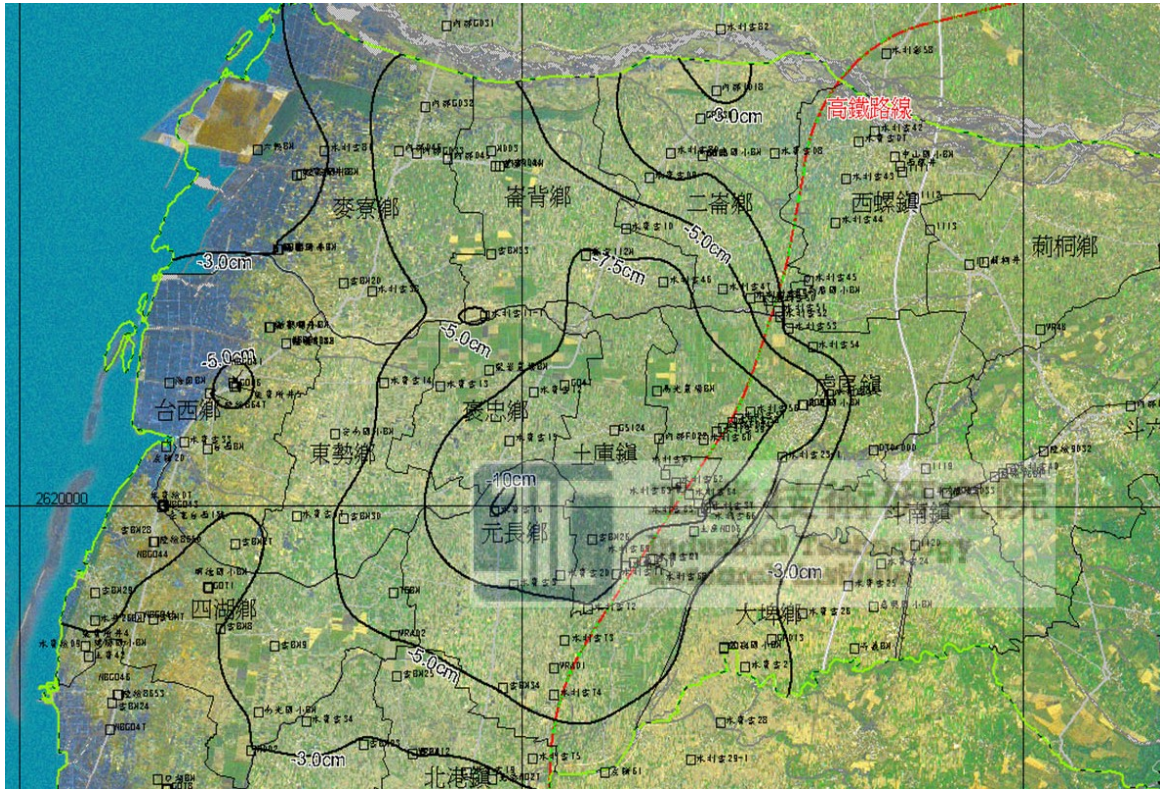


圖 4-1 實驗區年平均地層下陷速率圖(經濟部水利署，2008)

地層下陷量的分析是以 2007 年、2008 年與 2010 年共三個不同年份所蒐集之空載光達點雲資料進行橢球高程比對，2007、2008 年與 2010 年空載光達掃瞄相關飛航參數及統計資料詳見表 4-1。

表 4-1 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 | 2007.2.4 | 2008.3.16 | 2010.6.9 |
| 航線數(條) | 59 | 13 | 13 |
| 離地高(m) | 600 | 600 | 600 |
| 航速(公里/時) | 166 | 154 | 154 |
| 掃瞄角度(度) | ±15 | ±15 | ±15 |
| 雷射脈衝率(千赫茲) | 50 | 33 | 50 |
| 掃描頻率(千赫茲) | 43 | 33 | 33 |
| 掃描帶寬(m) | 322 | 322 | 322 |
| 航帶重疊(%) | 30 | 30 | 30 |
| 雷射點密度(點/m ²) | 6.4 | 3.4 | 4.3 |
| 內部精度(cm) | 4.6 | 3.0 | 3.0 |
| 地面主站(名稱) | PA01 | PA02 | |
| 有效網格數(個) | 779,824 | 785,522 | 798,769 |
| 平均高程(m) | 33.56 | 33.39 | 33.45 |
| 平均反射強度 | 14.4 | 8.6 | 12.3 |

資料分析流程如表 4-1，各程序之結果分別說明如下。

4.1 點雲網格化

將 2km×10km 的測區劃分為 5m×5m 大小的 80 萬個網格，供後續計算後分析其屬性（精度、坡度、坡向及反射強度）是否符合監測之所需。網格化過程係利用商業軟體 MicroStation 將 80 萬個網格繪製於圖面上，然後以 TerraScan 軟體將點雲分別分配至各網格中，最後將每個網格中的點雲資料存成 ASC II 格式的數據檔，內容包含點雲的坐標 X、Y、Z 及反射強度值 I。

4.2 擬合平面計算

分別完成上述三年的點雲資料網格化後，以 Borland Builder C⁺⁺ 軟體自行撰寫網格面的平面擬合程式（圖 4-2），以最小二乘法分別用各網格內之空載光達點雲資料擬合計算其平面係數、擬合面中心高程、擬合面精度及平均反射強度。將前述 2007、2008、2010 年所有網格面計算成果分別輸出至三個成果檔案，供後續監測面萃取之用。

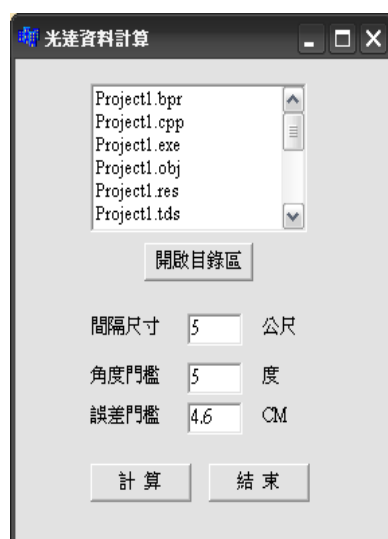


圖 4-2 擬合平面計算畫面

4.3 監測面的萃取

監測地層下陷需在不同時期共同的穩固監測面來觀察其高程變化，本研究自行撰寫程式（圖 4-3）以擬合面精度、反射強度及擬合面坡度、坡向等為參數來萃取出不同時期共同的堅固監測面，萃取參數說明如下：

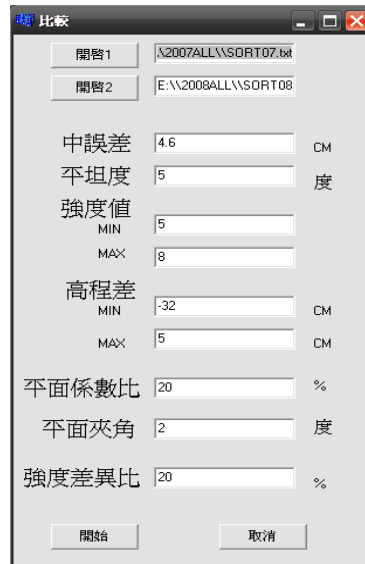


圖 4-3 監測面萃取程式畫面

4.3.1 擬合平面坡度

由於空載光達測量平面精度較高程精度差，一般經驗空載光達測量高程精度達 15 公分時，平面精度約在 50 公分左右。如監測面坡度過大，平面的誤差將會影響高程的大小，因此配合 2007、2008、2010 年空載光達掃瞄具 4.6、3.0、3.0 公分的內部精度(表 4-1)，將平面傾斜角度（坡度）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（ $0.5\text{ m} \times \tan 5^\circ \approx 0.046\text{ m}$ ）。

4.3.2 擬合平面精度

配合 2007、2008、2010 年空載光達掃瞄具 4.6、3.0、3.0 公分的內部精度成果，因此以擬合平面精度小於 4.6 公分者為平坦之監測面。

4.3.3 反射強度

除了擬合面的精度、坡度外，本研究嘗試以網格內之原始點雲平均反射強度來排除非自然變遷的區域（例如農耕地），以萃取出道路、屋頂、運動場、混凝土等平坦穩固之監測面。

由於 ALTM 3070 空載光達儀器的雷射發射強度，2007、2008、2010 年的平均反射強度並不同（表 4-1）。如圖 4-4 圖 4-5 即顯示 2007、2008 年的平均反射強度分布圖，因此可將不同年份之平均強度值以比例關係簡單改正。如將 2007 年所有點雲平均反射強度乘以 0.6 以比例簡單改正，以供後續反射強度比對之用。而 2007 年反射強度改正後與 2008 年平均反射強度的差值分佈如統計圖 4-6，雖然統計圖顯示改正後其差值並非全部為 0（全部為 0 表示已 100% 的改正），但其分佈狀況是以 0 為中心的常態分佈，亦即改正後大部份的差異值為 0，故以本法改正後作後續反射強度的比對尚屬合理。

同樣地若進行 2007 年與 2009 年或者 2007 年與 2010 年的監測面萃取時，則均將 2007 年平均強度值以比例關係簡單改正之。

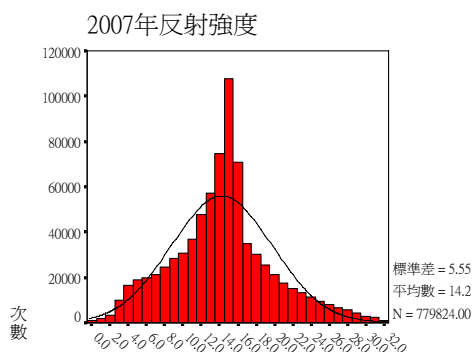


圖 4-4 2007 年反射強度分布圖

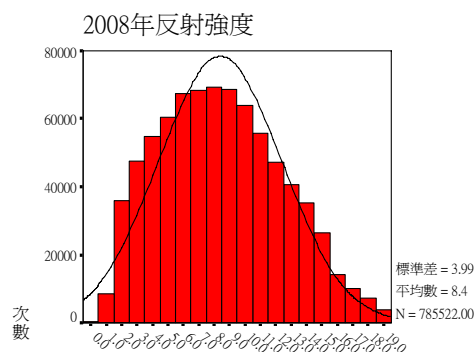


圖 4-5 2008 年反射強度分布圖

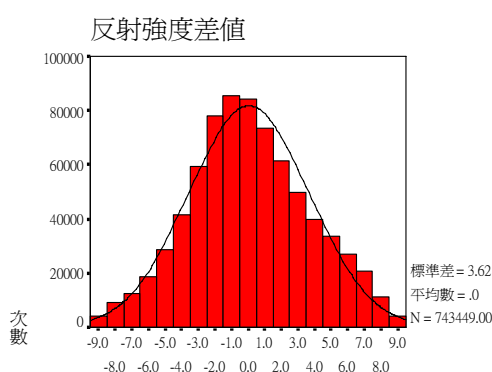


圖 4-6 2007、2008 年反射強度差值統計圖

1、同時期反射強度之差異：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（圖 4-7）套繪後以人工觀察發現 2008 年柏油道路強度值大約介於 5~8 之間，而屋頂、運動場、混凝土、人工草皮面等人工結構物強度值大多介於 14~18 之間，因此本研究擬以上述之平均反射強度的大小來區別不同屬性的監測面，期望提高穩固監測面萃取的正確率。

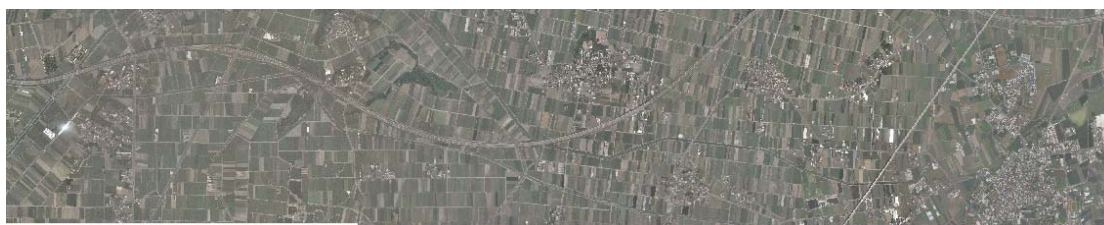


圖 4-7 測區航空正射影像圖

2、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（20%以內）來排除變化較大的農耕區。

4.3.4 坡向與坡度差異

當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（表示坡向之差異）應該為 1，但考慮受到各種誤差的影響，其坡向比值亦應趨近於 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，將以前後兩年同一擬合面的坡向差異 20% 以內且擬合面夾角（表示坡度之差異）在 2 度以內來萃取穩固的監測面。

4.3.5 萃取門檻值

由於空載光達點雲資料雖經特殊掃瞄設計，2008 年與 2010 年點雲資料經實地 GPS_RTK 檢測 10 個與 15 個檢核點，所得之檢核精度分別是 4.2cm 與 3.4cm，但由於每年平均下陷量約為 10cm，因此光達點雲資料較適合用來監測較長時期的地層下陷。因此本研究針對 2007~2010 年與 2008~2010 年兩相隔較長時期的光達資料進行分析。而由於近年來該區的地層下陷量每年約在 10cm 以下，因此以每年下陷約 10 公分為上限，計算出 2007~2010 年共 40 個月期間，若監測面下陷其高差範圍應在 -33.3 公分~0.0 公分之間；2008~2010 年共 27 個月期間，若監測面下陷其高差範圍應在 -22.5 公分~0.0 公分之間。

除限制下陷之高差範圍，以排除非屬地層下陷的變遷資訊之外，本研究經實驗結果設定反射強度差異 20% 以內、坡向差異 20% 以內、坡度差異 2 度以內為門檻值，取出穩固監測面。由於放寬萃取門檻值可增加萃取數量、但會降低萃取穩固監測面的正確率，而縮小萃取門檻值會減少萃取數量、但可提高萃取正確率。在考慮正確率與樣本數量的因素後，決定以上述差異量作為本研究的萃取門檻值。

4.4 下陷量成果

將測區劃分為 5m×5m 網格，且網格擬合平面傾斜角度（坡度）在 5 度以內，擬合平面精度在 4.6 公分以內，以第 3 節中所列方法得兩時期四種萃取法萃取穩固監測面之結果分別列於表 4-2~表 4-23 中，而經人工辨識不同時期不同萃取法所萃取之穩固監測面分布則如圖 3~6 所示。如第 3.5 節所述，表 4-2~表 4-23 中所謂萃取法 1 乃於萃取穩固監測面時除以推估先驗下限量作為高差範圍約制外，並限制擬合平面前後兩期坡度差異在 20% 以內、空間平面夾角差異在 2 度以內、以及平均反射強度差異在 20% 以內者。若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。

其中平均反射強度 5~8 的監測面大多為柏油路面，而反射強度 14~18 的監測面大多為道路、屋頂、運動場、混凝土、或人工草皮面。而依據經濟部水利署於雲林地區位於實驗區內 9 個水準點所計算的年平均下陷量如下：2007~2010 年的年平均下陷量是 6.9cm；2008~2010 年的年平均下陷量是 6.2cm，各不同時期所計算之年平均下陷量分別列於表標題後之括號內，以(水利署：-X.Ycm)表示。

表 4-2 2007~2010 年間不同條件監測面萃取與計算結果(水利署：-6.9cm)

| 萃取法 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------|-----------------|----------|----------|-------------|
| 平面平坦度 | 5 度以內 | | | |
| 擬合平面精度 | 4.6 公分以內 | | | |
| 高差範圍 | -32.1 公分~0.0 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 | 375 | 99 | 40 | 139 |
| 經人工辨識為穩固網格面之數量 | 290 | 83 | 27 | 110 |
| 正確率 | 77% | 84% | 68% | 79% |
| 平均高程差 (40 月) | -30.1 公分 | -30.0 公分 | -30.7 公分 | -30.2 公分 |
| 平均高程差 (12 月) | -9.0 公分 | -9.0 公分 | -9.2 公分 | -9.0 公分 |
| 穩固網格面分佈圖 | 圖 4-8 | — | — | 圖 4-10 |

圖 4-8 與圖 4-10 分別是萃取法 1 與萃取法 4 所萃取穩固網格面分佈圖，圖 4-9 與圖 4-11 則是對應的年下陷等值線圖。其作法是將實驗區以 1000m×1000m 大小劃分為 20 個區域，將其區域內過濾萃取所得之 5m×5m 網格高差平均後，繪製出年下陷等值圖。



圖 4-8 2007~2010 年間萃取法 1 穩固網格面分佈情況

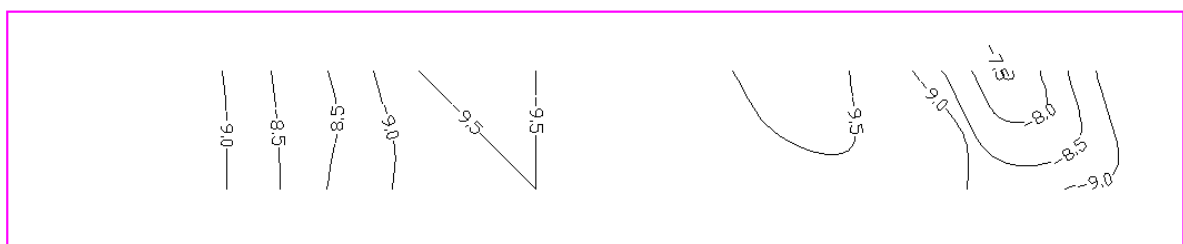


圖 4-9 2007~2010 年間萃取法 1 所得年下陷等值圖

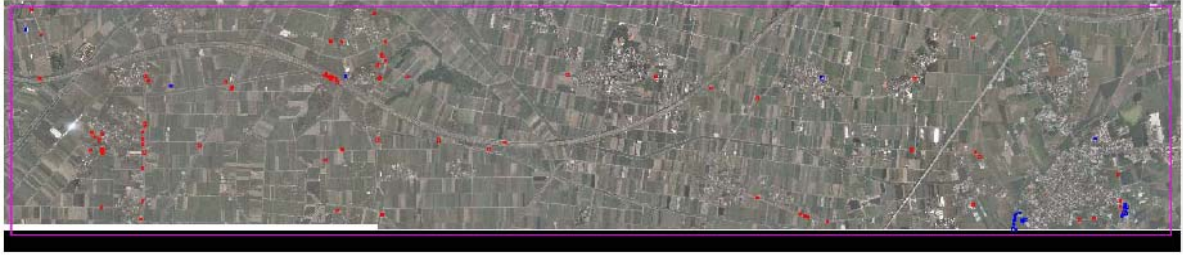


圖 4-10 2007~2010 年間萃取法 4 經人工辨識之穩固網格面分佈情況
(紅色：萃取法 2 藍色：萃取法 3)

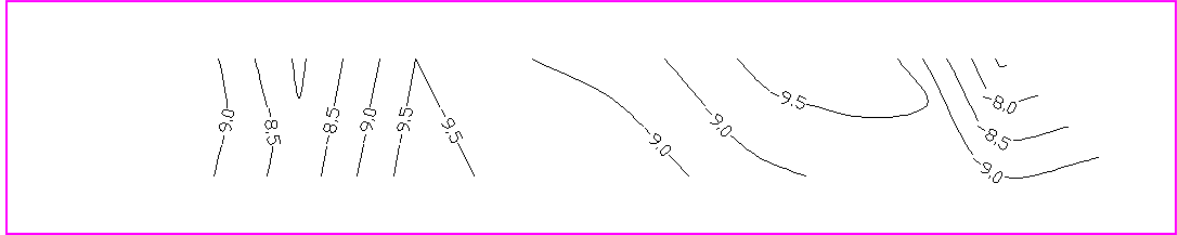


圖 4-11 2007~2010 年間萃取法 4 所得年下陷等值圖

表 4-3 2007~2010 年間不同條件監測面萃取與計算結果(水利署：-6.2cm)

| 萃取法 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------|-----------------|----------|----------|-------------|
| 平面平坦度 | 5 度以內 | | | |
| 擬合平面精度 | 4.6 公分以內 | | | |
| 高差範圍 | -32.1 公分~0.0 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 | 462 | 127 | 80 | 207 |
| 經人工辨識為穩固網格面之數量 | 387 | 96 | 75 | 171 |
| 正確率 | 84% | 76% | 94% | 83% |
| 平均高程差 (27 月) | -19.3 公分 | -20.7 公分 | -16.5 公分 | -18.9 公分 |
| 平均高程差 (12 月) | -8.6 公分 | -9.2 公分 | -7.3 公分 | -8.4 公分 |
| 穩固網格面分佈圖 | 圖 4-12 | — | — | 圖 4-14 |

圖 4-12 與圖 4-14 分別是萃取法 1 與萃取法 4 所萃取穩固網格面分佈圖，圖 4-13 與圖 4-15 則是對應的年下陷等值線圖。其作法同樣是將實驗區以 1000m×1000m 大小劃分為 20 個區域，將其區域內過濾萃取所得之 5m×5m 網格高差平均繪製年下陷等值圖。



圖 4-12 2008~2010 年間萃取法 1 經人工辨識之穩固網格面分佈情況

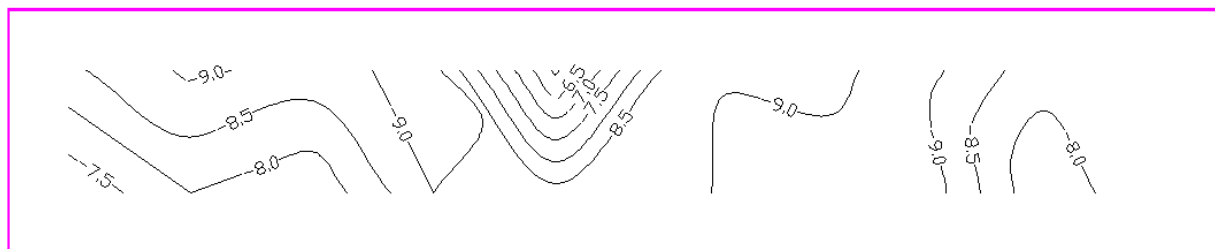


圖 4-13 2008~2010 年間萃取法 1 穩固網格面分佈情況



圖 4-14 2008~2010 年間萃取法 4 經人工辨識之穩固網格面分佈情況

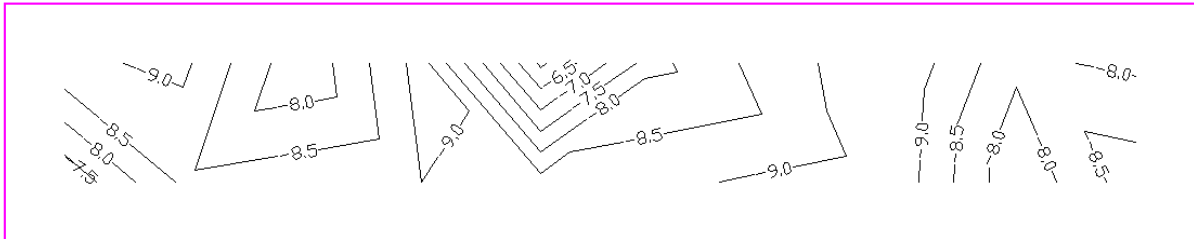


圖 4-15 2008~2010 年間萃取法 4 穩固網格面分佈情況

4.5 成果分析

由表2和表3可得知：

1. 空載光達反射強度會受到雷射光束的路徑、雷射光束的入射角、大氣層造成的衰減、雷射光束的發射能量和雷射儀器特性等眾多因素的影響(Luzum *et al.*, 2006)，但本研究中發現以簡單比例關係將前後不同時期的反射強度以2007 年為基準改正一致後，若不將平均反射強度細分成低反射與高反射強度（即萃取法4），雖然萃取的穩固監測面數量較少但萃取正確率約達到80%。即使不限制監測面平均反射強度的範圍（即萃取法1）萃取的穩固監測面正確率亦約達到80%。
2. 在表2與表3中，萃取法1與萃取法4的正確萃取率與平均下陷量結果差異不大，而與水利署的水準資料雖有2.1~2.4cm的差異，但下陷趨勢是一致的。也就是水利署的水準下陷資料顯示該區下陷的速率趨緩（由6.9cm變為6.2cm），而光達資料監測結果也顯示該區下陷的速率趨緩（由9cm 變為8.4或8.6cm）。

由表2與表3中可觀察出：雖然萃取時，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）兩種地物形成萃取法2與萃取法3，但無法明確看出平均反射強度的強弱對下陷結果有一定的影響趨勢。

五、結論

本研究以最新的空載光達測量技術，利用其能在短時間自動獲取整個區域較完整且高精度高密度的空間資料，進行地層下陷可行性的探討與評估。實驗中由光達資料中建構網格監測面，並由推估的先驗的地層下陷資訊和監測面之精度、坡度、坡向、反射強度等，探討萃取穩固監測面並計算監測面所得之年平均下陷量，進而與測區內 2010 年

經濟部水利署雲林地區的 9 個水準點的年平均下陷量進行比較，得到以下之結語：

- 1.以推估的先驗下陷量、網格擬合面的精度、擬合面的坡度、坡向及擬合面的反射強度為萃取門檻所發展出的穩固監測面萃取法，萃取正確率可達約 80%，對排除非因地層下陷而產生變遷的監測面有相當的助益。
- 2.不限制網格監測面平均反射強度與限制網格監測面平均反射強度於 5~8（柏油路面）及 14~18（道路、屋頂、運動場、混凝土、人工草皮面）的萃取法顯示：實驗區內的地層下陷量與水利署的水準下陷資料顯示的下陷趨勢是一致的，以本次測量數據精度為 5 公分的點雲高程而言，本研究的成果與方法應屬合理。

5.2 建議

1. 由上述成果可說明本研究對建立一套省時省力的監測模式，進而達到地層下陷監測自動化有相當助益，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。
2. 本研究雖僅以空載光達測量獲取的三維空間資料、反射強度及先驗下陷量推估高差範圍萃取監測面的地層下陷量，穩固監測面萃取正確率雖可達 80%，但統計之樣品數也因此減少許多。由於軟硬體限制並經參考相關文獻分析後，本研究僅實驗用 5m×5m 大小網格的監測面進行下陷資料計算與分析，並未對更小或更大的網格面進行測試與分析。5×5m 大小的網格面或許不是最佳的監測面，更多不同大小的網格面比較研究或許可適用不同型態的監測區域，或許能萃取更多、更正確的穩固監測面，來進一步提高地表監測工作的自動化與正確性。
3. 目前相關文獻對於空載光達測量反射強度的研究多偏重在反射強度的分類能力進而判斷地形地物，並未見到反射強度對高程精度影響的研究，這方面或許有值得進一步的研究與探討的議題。

六、致謝

本研究感謝經濟部水利署提供 2007 年空載光達資料。

七、參考文獻

1. Abshire, J. M., J.F. McGarray, L.K. Pacini, J.B. Blair, & C.G. Elman, 1994, *Laser Altimetry Simulator version 3.0*, User's Guide, NASA Technical Memorandum 104588, 66.
2. Ackermann, F. 1999, *Airborne laser scanning - present status and future expectations*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 54
3. Guo, Tao and Yoshifumi Yasuoka, 1998, *Combining high-resolution satellite imagery and airborne laser scanning data for generating bareland DEM in urban areas*, Proceedings

- of International Workshop on Visualization and Animation of Landscape, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Kunming, China, 26-28.
4. 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.
 5. 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.
 6. Matikainen, L., Hyypa, J., and Hyypa, 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
 7. Renslow M., 2001, *Development of A Bare Ground DEM and Canopy Layer In NW Forestlands Using High Performance LIDAR*, ESRI international user conference.
 8. 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.
 9. 內政部，2005，「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期中報告-2」。共 141 頁，工研院能資所執行。
 10. 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。
 11. 王匯智，2007，「完整波形分析對於提升空載光達系統定位精度之研究」，國立台灣大學土木工程學系，碩士論文：台北。
 12. 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。
 13. 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。
 14. 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
 15. 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。
 16. 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。

17. 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。
18. 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

八、國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

| |
|--|
| <p>1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> 達成目標</p> <p><input type="checkbox"/> 未達成目標（請說明，以 100 字為限）</p> <p><input type="checkbox"/> 實驗失敗</p> <p><input type="checkbox"/> 因故實驗中斷</p> <p><input type="checkbox"/> 其他原因</p> <p>說明：</p> <p>本計畫第三年工作項目為：</p> <p>(1).進行不同時期空載光達資料地層下陷量分析的計算模式實驗。</p> <p>(2).計算不同時期的地層下陷量和所蒐集的年度下陷量進行分析與探討。</p> <p>(3).撰寫第三年之研究成果報告。</p> <p>(4).發表研討會論文 1 篇。</p> <p>預計完成工作項目中均順利完成，因此研究內容與原計畫相符程度 100%，達成預期目標情況亦為 100%。</p> |
| <p>2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：</p> <p>論文：<input type="checkbox"/>已發表 <input type="checkbox"/>未發表之文稿 <input checked="" type="checkbox"/>撰寫中 <input type="checkbox"/>無</p> <p>專利：<input type="checkbox"/>已獲得 <input type="checkbox"/>申請中 <input checked="" type="checkbox"/>無</p> <p>技轉：<input type="checkbox"/>已技轉 <input type="checkbox"/>洽談中 <input checked="" type="checkbox"/>無</p> <p>其他：（以 100 字為限）</p> <p>發表一篇研討會論文(如後附件一)</p> <p>邱式鴻、李景中，2010，”以空載光達資料監測地層下陷”，第六屆海峽兩岸測繪發展研討會論文集，澳門，2010 年 10 月。</p> |
| <p>3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）</p> <p>研究成果具學術及應用價值。主要發現在於(1).將空載光達資料網格化並先驗下陷量推估之高差範圍、網格擬合面的精度、擬合面的坡度、坡向及擬合面的反射強度為萃取門檻所發展出的穩固監測面萃取法，萃取正確率可達 80%，對排除不穩固的網格監測面有相當的助益。(2).由研究成果可說明本研究對建立一套省時省力的監測模式，進而達到地層下陷監測自動化有相當助益，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。</p> |

附件一 研討會論文

1. 邱式鴻、李景中，2010，”以空載光達資料監測地層下陷”，第六屆海峽兩岸測繪發展研討會論文集，澳門，2010年10月。

第六屆海峽兩岸測繪發展研討會

2010年10月14-16日於澳門

以空載光達資料監測地層下陷

邱式鴻¹，李景中²

¹(國立政治大學 地政學系)

²(大陸工程公司)

【摘要】：

地層下陷是台灣西南部地區一個很嚴重的問題，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。研究重點在於建構地層下陷量分析模式並進行實驗。實驗中將由光達資料中建構網格監測面，並由先驗的地層下陷資訊和監測面之精度、坡度、坡向、反射強度等，進行成果萃取率之探討並計算監測面所得之年平均下陷量，進而與測區內 2010 年經濟部水利署雲林地區的 9 個水準點高差平均下陷量進行比較，希望由此成果可說明本研究對建立一套省時省力的監測模式，進而達到地層下陷監測自動化有相當助益，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；監測；空載光達

【作者簡介】：

邱式鴻，男，國立政治大學，副教授，台灣台北市 116 文山區指南路二段 64 號國立政治大學地政學系，+886-2-29393091#51657，chio0119@nccu.edu.tw。

李景中，男，大陸工程公司，捷運信義線 CR590A 工務所，測量隊長，台灣台北市信義路三段 100 號，+886-2-66306500，jin-jone@mail.cec.com.tw。

1. 前言與研究目的

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，主要區域集中在彰化、雲林及嘉義之沿海及內陸地區。造成地層下陷的主因之一為自然的地質作用；另一主因則是人為因素，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。而地層因累積下陷量降低地面高程，弱減河海堤保護標準、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。

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、(三)無線電波分層式監測井的地下監測方法。此外,空載光達技術,因為可於短時間內獲取大面積高密度且高精度的高程資料,其高程精度達公分級(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。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。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。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後續分析之成果。倘能透過不需赴現場觀測即可瞭解大面積區域之地層下陷之趨勢及分佈,不但節省成本亦可節省人力與時間,因此本研究探討並分析以空載光達資料進行地層下陷監測的試驗成果。空載光達機動性強且可以以更高效率,於短時間內獲取大面積且高密度、高精度的高程資料。若研究確實可行,將有助於未來進行地層下陷監測工作之進行。

2. 文獻回顧與分析

主要用於地表監測的空間測量技術,除了傳統的精密水準測量之外,還有GPS測高亦已經實際應用於地層下陷的研究,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。由兩個時期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。實測顯示,應用GPS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地表下陷情形。此法是以三軌道差分干涉方式,產生差分干涉圖像,求取地表位移量估算下陷量。將求出之下陷量與同年下半年中央地調所於該地區以GPS觀測資料比較分析,得到一致之下陷趨勢外,最大下陷速度約為2公分/月,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。

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。空載光達測量技術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，進而可推導出地面之三維坐標(圖1)。

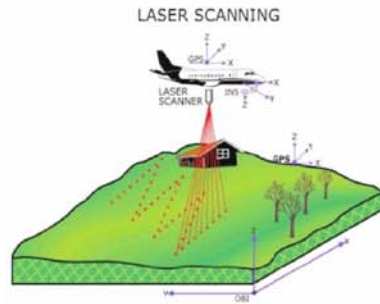


圖 1 空載光達原理圖示(Renslow, 2001)

除機動性之外，空載光達測量技術具有(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之特性(劉進金, 2005)。本研究引進此測量技術，期待以高度機動性，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，施測相隔特定時間間隔實驗區的地形變化。

空載光達資料其高程精度雖高，其誤差亦約為 10cm，因此是否適用於地層下陷監測，實有待進一步研究，所以本研究主要是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，蒐集實驗區現有的空載光達資料，探討以空載光達進行地層下陷的關鍵因素以及萃取穩固監測面的方法。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。

2. 主要研究流程與研究方法

本研究蒐集涵蓋目標區之空載光達資料，分析研究期間內空載光達資料橢球高程之變化以求地層下陷量。本文針對 2007 年 7 月 (許海龍, 2007)、2008 年 3 月和 2010 年 6 月蒐集到空載光達資料測試地層下陷量分析計算模式，比較所計算之地層下陷量和所蒐集的年度下陷量。研究方法係首先將監測區內掃描的光達點雲資料進行網格化分群；接著，計算網格區域內所有光達點擬合平面的中心高程；然後，以自動輔以人工辨識的方式萃取出平坦、穩固的網格區域做為監測面；最後，進行不同時期網格監測面高程差異比較，以求出地層下陷量並和所蒐集的年度下陷量進行分析與探討。研究流程如圖 2。

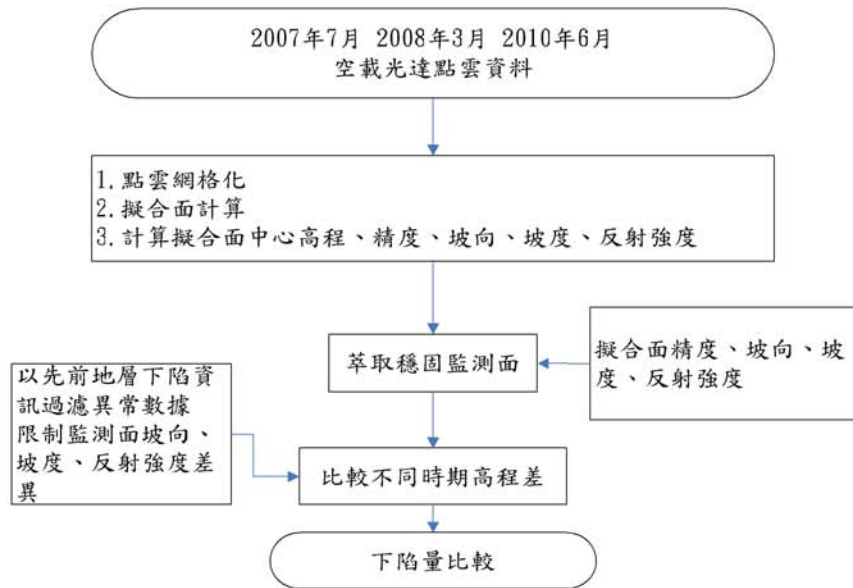


圖 2 研究流程圖

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。2.相同的基準。3.安排相同條件的觀測程序。4.重複監測頻率需求。由於點雲的位置具有隨機性，無法比較不同時期某個固定點位的高程差異，為求不同時期有相同的比較基準，因此參考航帶平差比對共軛面的作法，採用區域適中(大區域可分割成數塊區域計算，例如 $5m \times 5m$)、精度高、坡度變化小及穩定不易變化的區域的人造平坦面中心的地形地物面作為監測面，並以監測面內點雲擬合平面中心高程來進行不同時期地層下陷的比對。

本研究進行方式說明如下：

3.1 測區網格化

依據研究中的光達密度約為 $4 \text{ 點}/\text{m}^2$ ，在 $5m \times 5m = 25\text{m}^2$ 大小面積內平均將有 100 點的點雲資料，觀測點數達 100 點以上。因此試驗中將試驗區劃分為如 $5 \times 5m$ 大小的網格(監測面)，供後續計算後分析其屬性(精度、坡度、坡向及反射強度)是否符合監測之所需。

3.2 擬合面計算

將不同時期網格化的點雲資料，以最小二乘法分別用各網格內之空載光達點雲資料擬合計算其平面係數、擬合面中心高程、擬合面精度及平均反射強度，並以擬合平面之中心高程來代表網格中心高程，供後續監測面萃取之用。

3.3 監測面的萃取

監測地層下陷需在不同時期共同的穩固監測面來觀察其高程變化，本研究以擬合面精度、反射強度及擬合面坡度、坡向等為參數來萃取出不同時期共同的堅固監測面，萃取參數說明如下：

3.3.1 擬合平面坡度

由於空載光達測量平面精度較高程精度差，一般經驗空載光達測量高程精度達 15 公分時，平面精度約在 50 公分左右(Habib *et al.*, 2006)。如監測面坡度過大，平面的誤差將會影響高程的大小，因此配合空載光達掃描的內部精度，將平面傾斜角度（坡度）控制，使點雲因平面誤差而造成的高程誤差保持在合理之精度範圍以內。

3.3.2 擬合平面精度

配合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空載光達掃描的內部精度者為平坦之監測面。

3.3.3 反射強度

Song *et al.* (2002) 研究認為雖然空載光達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。因此除了擬合面的精度、坡度外，本研究嘗試以網格內之原始點雲平均反射強度來排除非自然變遷的區域（例如農耕地），以萃取出道路、屋頂、運動場、混凝土等平坦穩固之監測面。

1、同時期反射強度之差異

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以人工觀察柏油道路、以及屋頂、運動場、混凝土、人工草皮面等人工結構物強度值範圍，再以上述之平均反射強度的大小來區別不同屬性的監測面，期望提高穩固監測面萃取的正確率。

2、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（20%以內）來排除變化較大的農耕區。

3.3.4 坡向與坡度差異

若前後兩年穩定監測面的空間平面方程式分別以式 (3.3.4.1)、(3.3.4.2) 表示。

$$Z_1 = a_1X + b_1Y + c_1 \quad (3.3.4.1)$$

$$Z_2 = a_2X + b_2Y + c_2 \quad (3.3.4.2)$$

X、Y、Z：點坐標； a_1 、 a_2 ：空間平面 X 方向係數；
 b_1 、 b_2 ：空間平面 Y 方向係數； c_1 、 c_2 ：空間平面常係數

則當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（表示坡向之差異）應該為 1，但考慮受到各種誤差的影響，其坡向比值亦應趨近於 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，將以不同時期同一擬合面的坡向差異 20% 以內且擬合面夾角（表示坡度之差異）在 2 度以內來萃取穩固的監測面。

3.3.5 下陷量成果

研究實驗採四種方式萃取監測面比較不同時期的高程差異，所有方法均以擬合平面精度和坡度先萃取穩定監測面，比較不同時期監測面的高程差異時則再以先驗的地層下陷資料作為約制條件濾除較不合理的下陷量，分析時則再以兩不同時期的監測面坡度差和坡向差、以及反射強度差均限制於一臨界範圍計算其平均下陷量；四種方法之差異則是第一種方法是 unlimited 監測面平均反射強度之範圍；第二、三種方法則是將監測面平均反射強度限制在實驗中所測試出的低與高反射強度，即 5~8 為低反射強度、14~18 為高反射強度；第四法則合併二、三法之資料計算平均下陷量。

3.3.6 下陷量檢核

地層下陷量的檢核係採用穩固監測面萃取法成果分別與比對近年來經濟部水利署於雲林地區位於實驗區內水準點的沉陷量進行比較。

3. 主要研究成果

本研究實驗區的選定，係以橫跨下陷速率較大的雲林縣元長鄉、土庫鄉，長為 10km、寬 2km 的範圍。地層下陷量的分析是以 2007 年、2008 年與 2010 年共三個不同年份所蒐集之空載光達點雲資料進行橢球高程比對，2007、2008 年與 2010 年空載光達掃瞄相關飛航參數及統計資料詳見表 1。

表 1、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 | 2007.2.4 | 2008.3.16 | 2010.6.9 |
|--------------------------|----------|-----------|----------|
| 航線數(條) | 59 | 13 | 13 |
| 離地高(m) | 600 | 600 | 600 |
| 航速(公里/時) | 166 | 154 | 154 |
| 掃瞄角度(度) | ±15 | ±15 | ±15 |
| 雷射脈衝率(千赫茲) | 50 | 33 | 50 |
| 掃描頻率(千赫茲) | 43 | 33 | 33 |
| 掃描帶寬(m) | 322 | 322 | 322 |
| 航帶重疊(%) | 30 | 30 | 30 |
| 雷射點密度(點/m ²) | 6.4 | 3.4 | 4.3 |
| 內部精度(cm) | 4.6 | 3.0 | 3.0 |
| 地面主站(名稱) | PA01 | | PA02 |
| 有效網格數(個) | 779,824 | 785,522 | 798,769 |
| 平均高程(m) | 33.56 | 33.39 | 33.45 |
| 平均反射強度 | 14.4 | 8.6 | 12.3 |

試驗中將 $2\text{km}\times 10\text{km}$ 的測區劃分為 $5\text{m}\times 5\text{m}$ 大小的80萬個網格，供後續計算分析其屬性（精度、坡度、坡向及反射強度）是否符合監測之所需。分別完成上述三年的點雲資料網格化後，以 Borland Builder C++ 軟體自行撰寫網格面的平面擬合程式，以最小二乘法分別用各網格內之空載光達點雲資料擬合計算其平面係數、擬合面中心高程、擬合面精度及平均反射強度。將前述 2007、2008 年與 2010 年所有網格面計算成果分別輸出至三個成果檔案，供後續監測面萃取之用。監測地層下陷需在不同時期共同的穩固監測面來觀察其高程變化，本研究自行撰寫程式以擬合面精度、反射強度及擬合面坡度、坡向等為參數來萃取出不同時期共同的堅固監測面。由於空載光達點雲資料雖經特殊掃瞄設計，2008 年與 2010 年點雲資料經實地 GPS_RTK 檢測 10 個與 15 個檢核點，所得之檢核精度分別是 4.2cm 與 3.4cm，但由於每年平均下陷量約為 10cm，因此光達點雲資料較適合用來監測較長時期的地層下陷。因此本研究針對 2007~2010 年與 2008~2010 年兩相隔較長時期的光達資料進行分析。而由於近年來該區的地層下陷量每年約在 10cm 以下，因此以每年下陷約 10 公分為上限，計算出 2007~2010 年共 40 個月期間，若監測面下陷其高差範圍應在 -33.3 公分~0.0 公分之間；2008~2010 年共 27 個月期間，若監測面下陷其高差範圍應在 -22.5 公分~0.0 公分之間。除限制下陷之高差範圍之外，本研究經實驗結果取反射強度差異 20%、坡向差異 20%、坡度差異 2 度以內取出穩固監測面，由於放寬萃取門檻值可增加萃取數量、但會降低萃取正確率（穩固網格面），而縮小萃取門檻值會減少萃取數量、但可提高萃取正確率，在考慮正確率與樣本數量的因素後，決定以上述差異量作為本研究的萃取門檻值。

將測區劃分為 $5\text{m}\times 5\text{m}$ 網格，且網格擬合平面平坦度在 5 度以內，擬合平面精度在 4.6 公分以內，以 3.3.5 節中所列方法萃取監測面並套於正射影像上以人工判定監測面是否為穩固面，所得的不同時期四種萃取法結果分別列於表 2~3 中，而經人工辨識不同時期不同萃取法所萃取之穩固監測面分布則如圖 3~6 所示。其中平均反射強度 5~8 的監測面大多為柏油路面，而反射強度 14~18 的監測面大多為道路、屋頂、運動場、混凝土、或人工草皮面。而依據經濟部水利署於雲林地區位於實驗區內 9 個水準點所計算的平均下陷量分別是 2007~2010 年的年平均下陷量是 6.9cm；2008~2010 年的年平均下陷量是 6.2cm。各不同時期所計算之年平均下陷量分別列於表標題後之括符內以（水利署：-X.Ycm）表示。

表 2、2007~2010 年間不同條件監測面萃取與計算結果(水利署：-6.9cm)

| 項目 \ 萃取法 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------|-----------------|----------|----------|----------------|
| 平面坡度 | 5 度以內 | | | |
| 平面精度 | 4.6 公分以內 | | | |
| 先驗下陷量限制高程差範圍 | -33.3 公分~0.0 公分 | | | |
| 平均反射強度差異 | 20%以內 | | | |
| 平面係數差異 (坡向差異) | 20%以內 | | | |
| 平面坡度差異 | 2 度以內 | | | |
| 平均反射強度分類 | 無 | 5~8 | 14~18 | 5~8 & 14~18 |
| 自動萃取網格數量 | 375 個 | 99 個 | 40 個 | 139 個 |
| 經人工辨識為穩固 監測面之數量 | 290 個 | 83 個 | 27 個 | 110 個 |
| 正確率(穩固/萃取) | 77% | 84% | 68% | 79% |
| 平均高程差(40 月) | -30.1 公分 | -30.0 公分 | -30.7 公分 | -30.2 公分 |
| 平均高程差(12 月) | -9.0 公分 | -9.0 公分 | -9.2 公分 | -9.0 公分 |



圖 3、2007~2010 年間萃取法 1 經人工辨識之穩固網格面分佈情況

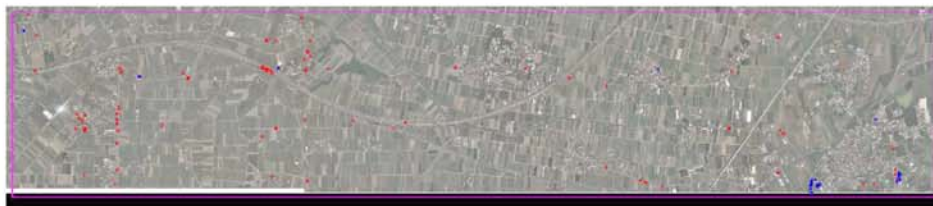


圖 4、2007~2010 年間萃取法 4 經人工辨識之穩固網格面分佈情況
(紅色：萃取法 2 藍色：萃取法 3)

表3、2008年~2010年不同條件監測面萃取與計算結果(水利署：-6.2cm)

| 項目 \ 萃取法 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------|---------------|---------|---------|----------------|
| 平面坡度 | 5度以內 | | | |
| 平面精度 | 4.6公分以內 | | | |
| 先驗下陷量限制高程差範圍 | -22.5公分~0.0公分 | | | |
| 平均反射強度差異 | 20%以內 | | | |
| 平面係數差異 (坡向差異) | 20%以內 | | | |
| 平面坡度差異 | 2度以內 | | | |
| 平均反射強度分類 | 無 | 5~8 | 14~18 | 5~8 & 14~18 |
| 自動萃取網格數量 | 462個 | 127個 | 80個 | 207個 |
| 經人工辨識為穩固網格面之數量 | 387個 | 96個 | 75個 | 171個 |
| 正確率(穩固/萃取) | 84% | 76% | 94% | 83% |
| 平均高程差(27月) | -19.3公分 | -20.7公分 | -16.5公分 | -18.9公分 |
| 平均高程差(12月) | -8.6公分 | -9.2公分 | -7.3公分 | -8.4公分 |



圖5、2008~2010年間萃取法1經人工辨識之穩固網格面分佈情況



圖6、2008~2010年間萃取法4經人工辨識之穩固網格面分佈情況
(紅色：萃取法2 藍色：萃取法3)

5.3 成果分析

1. 空載光達反射強度會受到雷射路徑的長度、雷射光束的入射角、大氣層造成的衰減、雷射光束的能量和雷射儀器特性等眾多因素的影響 (Luzum et al.,2006)，但本研究僅簡單的將前後不同時期的反射強度以 2007 年為基準改正一致後，若不將平均反射強度細分成低反射與高反射強度(即萃取法 4)，雖然萃取的穩固監測面數量較少但萃取正確率約達到 80%。即使不限制監測面平均反射強度的範圍(即萃取法 1) 萃取的穩固監測面正確率亦約達到 80%。
2. 在表 2 與表 3 中的萃取法 1 與萃取法 4 正確萃取率與平均下陷量結果差異不大，而與水利署的水準資料差異雖在 2.1~2.4cm 之間，但下陷趨勢是一致的。也就是水利署的水準下陷資料顯示該區下陷趨緩(由 6.9cm 變為 6.2cm)，而光達資料監測結果也顯示乾區下陷趨緩(由 9cm 變為 8.4 或 8.6cm)。
3. 由表 2 與表 3 中可觀察出雖然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)兩種地物形成萃取法 3 與萃取法 4，但無法明確看出平均反射強度的強弱對下陷結果有一定的影響趨勢。

4. 結語

本研究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。實驗中由光達資料中建構網格監測面，並由先驗的地層下陷資訊和監測面之精度、坡度、坡向、反射強度等，進行成果萃取率之探討並計算監測面所得之年平均下陷量，進而與測區內 2010 年經濟部水利署雲林地區的 9 個水準點高差平均下陷量進行比較，得到以下之結語：

- 5.1 以先驗下陷量、網格擬合面的精度、擬合面的坡度、坡向及擬合面的反射強度為萃取門檻所發展出的穩固監測面萃取法，萃取正確率可達 80%，對排除不穩固的網格監測面有相當的助益。
- 5.2 不限制網格監測面平均反射強度與限制網格監測面平均反射強度於 5~8(柏油路面) 及 14~18(道路、屋頂、運動場、混凝土、人工草皮面)的萃取法顯示實驗區內的地層下陷量與水利署的水準下陷資料顯示的下陷趨勢是一致的，以一般空載光達測量 15 公分的高程精度，本次測量數據精度為 5 公分的點雲高程而言，本研究的成果與方法應屬合理。

由此成果可說明本研究對建立一套省時省力的監測模式，進而達到地層下陷監測自動化有相當助益，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。

致謝

感謝經濟部水利署提供空載光達資料與水準下陷資料

參考文獻

- i、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.
- ii、Luzum, B., Starek, M. and Slatton, K.C., 2006, "Normalizing ALSM intensities, Geosensing Engineering and Mapping (GEM)", Center Report No. Rep_2006-12-001, Civil and Coastal Engineering Department, University of Florida
- iii、Matikainen, L., Hyypa, J., and Hyypa, H., 2003. *Automatic detection of buildings from laser scanner data for map updating*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 3/W13,218-224
- iv、Renslow M., 2001, *Development of A Bare Ground DEM and Canopy Layer In NW Forestlands Using High Performance LIDAR*, ESRI international user conference.
- v、Song, J.-H., Han, S.-H., Yu, K., and Kim, Y.-I., 2002, *Assessing the possibility of land-cover classification using LIDAR intensity data*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 3B, 259-262.
- vi、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。
- vii、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。
- viii、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/>；取用日期2006年12月12日。
- ix、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。
- x、許海龍，2007，「雲林地層下陷地區地形變遷調查研究」，經濟部水利署。
- xi、柳志錫、譚凱英，2006，「地層下陷之監測方法」。website: <http://www.subsidence.org.tw/>；取用日期2008年02月18日
- xii、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。

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2011/01/10

| | |
|-----------|--|
| 國科會補助計畫 | 計畫名稱: 子計畫:以空載光達技術進行地層下陷監測之研究(III) |
| | 計畫主持人: 邱式鴻 |
| | 計畫編號: 98-2625-M-004-001- 學門領域: 永續發展研究-工程技術 |
| 無研發成果推廣資料 | |

98 年度專題研究計畫研究成果彙整表

| 計畫主持人：邱式鴻 | | 計畫編號：98-2625-M-004-001- | | | | | |
|---|-------------|-------------------------|-----------------|------------|------|-------------------------------------|-----|
| 計畫名稱：多時序三維空間資訊於地層下陷監測及分析--子計畫：以空載光達技術進行地層下陷監測之研究(III) | | | | | | | |
| 成果項目 | | 量化 | | | 單位 | 備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等） | |
| | | 實際已達成數（被接受或已發表） | 預期總達成數(含實際已達成數) | 本計畫實際貢獻百分比 | | | |
| 國內 | 論文著作 | 期刊論文 | 0 | 0 | 100% | 篇 | |
| | | 研究報告/技術報告 | 0 | 0 | 100% | | |
| | | 研討會論文 | 0 | 0 | 100% | | |
| | | 專書 | 0 | 0 | 100% | | |
| | 專利 | 申請中件數 | 0 | 0 | 100% | 件 | |
| | | 已獲得件數 | 0 | 0 | 100% | | |
| | 技術移轉 | 件數 | 0 | 0 | 100% | 件 | |
| | | 權利金 | 0 | 0 | 100% | 千元 | |
| | 參與計畫人力（本國籍） | 碩士生 | 1 | 0 | 100% | 人次 | |
| | | 博士生 | 0 | 0 | 100% | | |
| 博士後研究員 | | 0 | 0 | 100% | | | |
| 專任助理 | | 0 | 0 | 100% | | | |
| 國外 | 論文著作 | 期刊論文 | 0 | 0 | 100% | 篇 | |
| | | 研究報告/技術報告 | 0 | 0 | 100% | | |
| | | 研討會論文 | 1 | 1 | 100% | | |
| | | 專書 | 0 | 0 | 100% | | 章/本 |
| | 專利 | 申請中件數 | 0 | 0 | 100% | 件 | |
| | | 已獲得件數 | 0 | 0 | 100% | | |
| | 技術移轉 | 件數 | 0 | 0 | 100% | 件 | |
| | | 權利金 | 0 | 0 | 100% | 千元 | |
| | 參與計畫人力（外國籍） | 碩士生 | 0 | 0 | 100% | 人次 | |
| | | 博士生 | 0 | 0 | 100% | | |
| 博士後研究員 | | 0 | 0 | 100% | | | |
| 專任助理 | | 0 | 0 | 100% | | | |

1. 邱式鴻、李景中，2010，'以空載光達資料監測地層下陷'，第六屆海峽兩岸測繪發展研討會論文集，澳門，2010年10月。

| | |
|--|---|
| <p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p> | 無 |
|--|---|

| | 成果項目 | 量化 | 名稱或內容性質簡述 |
|---|-----------------|----|-----------|
| 科 教 處 計 畫 加 填 項 目 | 測驗工具(含質性與量性) | 0 | |
| | 課程/模組 | 0 | |
| | 電腦及網路系統或工具 | 0 | |
| | 教材 | 0 | |
| | 舉辦之活動/競賽 | 0 | |
| | 研討會/工作坊 | 0 | |
| | 電子報、網站 | 0 | |
| | 計畫成果推廣之參與(閱聽)人數 | 0 | |

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

發表一篇研討會論文

邱式鴻、李景中，2010，'以空載光達資料監測地層下陷'，第六屆海峽兩岸測繪發展研討會論文集，澳門，2010 年 10 月。

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

研究成果具學術及應用價值。主要發現在於(1). 將空載光達資料網格化並先驗下陷量推估之高差範圍、網格擬合面的精度、擬合面的坡度、坡向及擬合面的反射強度為萃取門檻所發展出的穩固監測面萃取法，萃取正確率可達 80%，對排除不穩固的網格監測面有相當的助益。(2). 由研究成果可說明本研究對建立一套省時省力的監測模式，進而達到地層下陷監測自動化有相當助益，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。