

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(II) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：整合型
計畫編號：NSC 97-2625-M-004-001-
執行期間：97年08月01日至98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：學士級-專任助理人員：黃炳瑜
碩士班研究生-兼任助理人員：謝幸宜
其他-兼任助理人員：李景中

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 99 年 01 月 15 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(II)

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 97-2625-M-004-001-

執行期間：97年08月01日至98年10月31日

計畫主持人：邱式鴻

計畫參與人員：李景中、謝幸宜、黃炳瑜

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

中華民國九十八年十月卅一日

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(II)

Land Subsidence Monitoring Using Airborne Lidar Surveying Technique

計畫編號：NSC 97-2625-M-004 -001 -

執行期限：97 年 8 月 1 日至 98 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：李景中 國立政治大學碩士在職專班碩士

共同研究員：謝幸宜 國立政治大學碩士生

共同研究員：黃炳瑜 國立政治大學學士

*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二年之計畫成果，本年度研究重點在於以經濟部水利署於 96 年與本子計畫於計畫執行第一年所蒐集之 97 年空載光達資料，利用本子計畫第一年所建構地層下陷量分析模式進行實驗，分析影響不同時期空載光達資料進行地層下陷量計算的可能因素。最後對計算出的地層下陷量和所蒐集的年度水準測量下陷資料以及下陷等值圖進行分析與探討。本子計畫第一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。實驗結果經由網格監測面的精度、坡度、坡向、反射強度、道路範圍等為門檻值，可萃取出 80% 以上正確率的穩固監測面，且其高差成果與長期監測成果的平均值差異在 1.3 公分至 2.9 公分之間，由此成果可以說明本研究成果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的目的有相當幫助，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、災害模擬。

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 collect point clouds with high point density in short time. By using the above-mentioned characteristics, airborne LIDAR data is highly potential to provide global data for land subsidence in short time. This study presented the results of the second year. The objective of this study in the second year is to test the algorithm for land subsidence analysis developed in the first year by using the collected airborne LIDAR data in 2007 and 2008. The possible factors affect the algorithm will be investigated and the caculated amount of land subsidence will be verified by annual subsidence amount collected by leveling surveying and isarithmic map caculated from annual subsidence amount. The proposed algorithm for land subsidence analysis is first to divide the collecting DSM points 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, or by using road information. The extracted correct rate can be more than 80%. The discrepancy of elevation difference between this study and long-term monitoring result is between 1.3 and 2.9 cm. It proves the proposed approach is helpful on constructing the automatic method for land subsidence monitoring in the future.

Keywords: Land subsidence, LIDAR, Disaster Simulation.

目 錄

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 錄.....	III
表目錄.....	V
圖目錄.....	VI
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.....	5
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.....	10
4.3.5 萃取門檻值.....	10
4.4 下陷量成果.....	11
4.4.1 不考慮是否為穩固監測網格面的高差成果.....	11
4.4.2 萃取穩固監測網格面的高差成果.....	11
4.4.3 以低反射強度萃取監測網格面的高差成果.....	13
4.4.4 以道路範圍萃取監測網格面的高差成果.....	16
4.5 下陷量檢核.....	19
4.5.1 2008 年雲林地區水準點沉陷紀錄的比對.....	19
4.5.2 2008 年雲林地區下陷等值圖的比對.....	20
4.5.3 小結.....	24
五、結論與建議.....	26
六、致謝.....	27

七、參考文獻.....	28
八、計畫成果自評.....	29
附件一 研討會論文	31
附件二 出國成果報告書	49

表目錄

表 4-1 2007、2008 年空載光達測量之相關統計資料	7
表 4-2 不同條件監測面萃取與計算結果	12
表 4-3 高程差與反射強度相關係數表	14
表 4-4 高程差與高反射強度相關係數表	14
表 4-5 高程差與低反射強度相關係數表	15
表 4-6 高程差與高反射強度差異相關係數表	15
表 4-7 高程差與低反射強度差異相關係數表	15
表 4-8 樣本統計量 (公分)	16
表 4-9 平均數相等的t檢定 (公分)	16
表 4-10 不同Buffer設定道路寬度萃取監測面與計算結果.....	17
表 4-11 指定道路範圍+反射強度萃取結果	18
表 4-12 點雲高程差與水準點高程差比較表 (單位：公尺)	19
表 4-13 水準點-點雲高差成對樣本檢定 (公分)	20
表 4-14 點雲平均反射強度	20
表 4-15 2007 年 8 月至 2008 年 5 月水準點檢測高差成果	21
表 4-16 萃取法 2 高差等值線相交點數紀錄統計表	22
表 4-17 萃取法 2 高差等值線成對樣本檢定 (公分)	23
表 4-18 萃取法 5 高差等值線相交點數紀錄統計表	23
表 4-19 萃取法 5 高差等值線成對樣本檢定 (公分)	24

圖目錄

圖 2-1 空載光達的測量原理圖示	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	8
圖 4-4 2007 年反射強度分布圖	9
圖 4-5 2008 年反射強度分布圖	9
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 不考慮是否為穩固監測面高差統計	11
圖 4-9 95%信賴區間的高差統計	11
圖 4-10 萃取法 1 高程差統計圖	12
圖 4-11 萃取法 2 高程差統計圖	12
圖 4-12 萃取法 3 高程差統計圖	12
圖 4-13 萃取法 4 高程差統計圖	12
圖 4-14 萃取法 1 穩固網格面分佈情況	13
圖 4-15 萃取法 4 穩固網格面分佈情況	13
圖 4-16 光達回波感應器偵測時間方法示意圖 (Abshire <i>et al.</i> , 1994)	13
圖 4-17 低反射強度且低反射強度差異監測面高程差統計圖	16
圖 4-18 4m道路範圍內監測網格面高程差統計圖	17
圖 4-19 測區內水準點分佈圖	19
圖 4-20 2008 年經濟部水利署於實驗區附近原始下陷等值圖	21
圖 4-21 2008 年經濟部水利署於實驗區附近換算年下陷等值圖	22
圖 4-22 萃取法 2 高差成果於實驗區繪製下陷等值圖	22
圖 4-23 經濟部水利署與萃取法 2 下陷等值線套繪圖	22
圖 4-24 經濟部水利署與萃取法 5 下陷等值線套繪圖	23
圖 4-25 高鐵高架橋面	26

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。

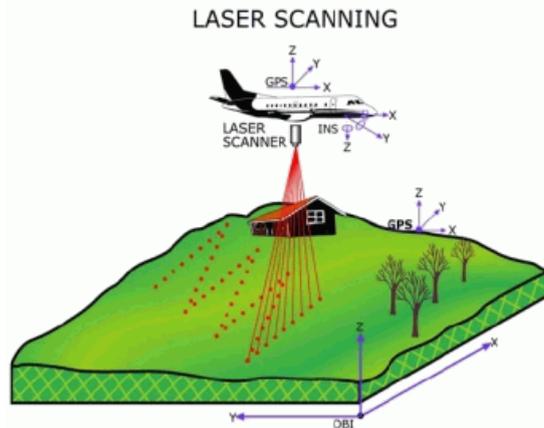


圖 2- 1 空載光達的測量原理圖示(Renslow, 2001)

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二年，研究工作內容包含：(1).蒐集經濟部水利署 96 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(97 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。(2).分析各種影響地層下陷量分析計算模式的可能因素。(3).將地層下陷量和所蒐集的年度下陷量進行分析與探討。(4).撰寫第二年之研究成果報告。(5).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。

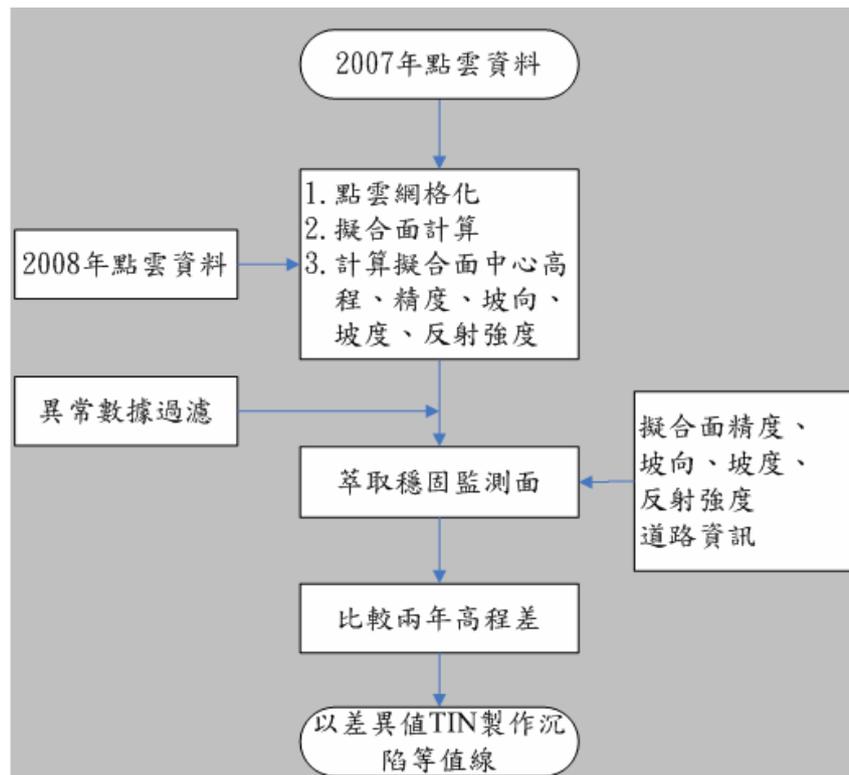


圖 3-1 計畫研究流程圖

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。今年度重點在於如何比對點雲資料不同時期的高程變化。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降低隨機誤差影響，且為了避免高差因 DSM、DEM 模型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。

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，無法比較前後兩年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

監測地層下陷需在相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

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

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

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

則當前後兩年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 4 種方式萃取監測面比較不同時期的高程差異：一是不考慮是否為穩固監測網格面，僅考慮網格內點雲所擬合之坡度及擬合平面精度；二是除上述條件外，再加上擬合平面的坡度差異、坡向差異及平均反射強度分類及差異約制萃取穩固監測網格面的高差成果；三則是除一、二條件之外再以低反射強度萃取監測網格面；四則是以道路範圍萃取監測網格面。

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與比對經濟部水利署 2008 年雲林地區位於實驗區內水準點的沉陷量及下陷等值圖成果進行比較。

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)。

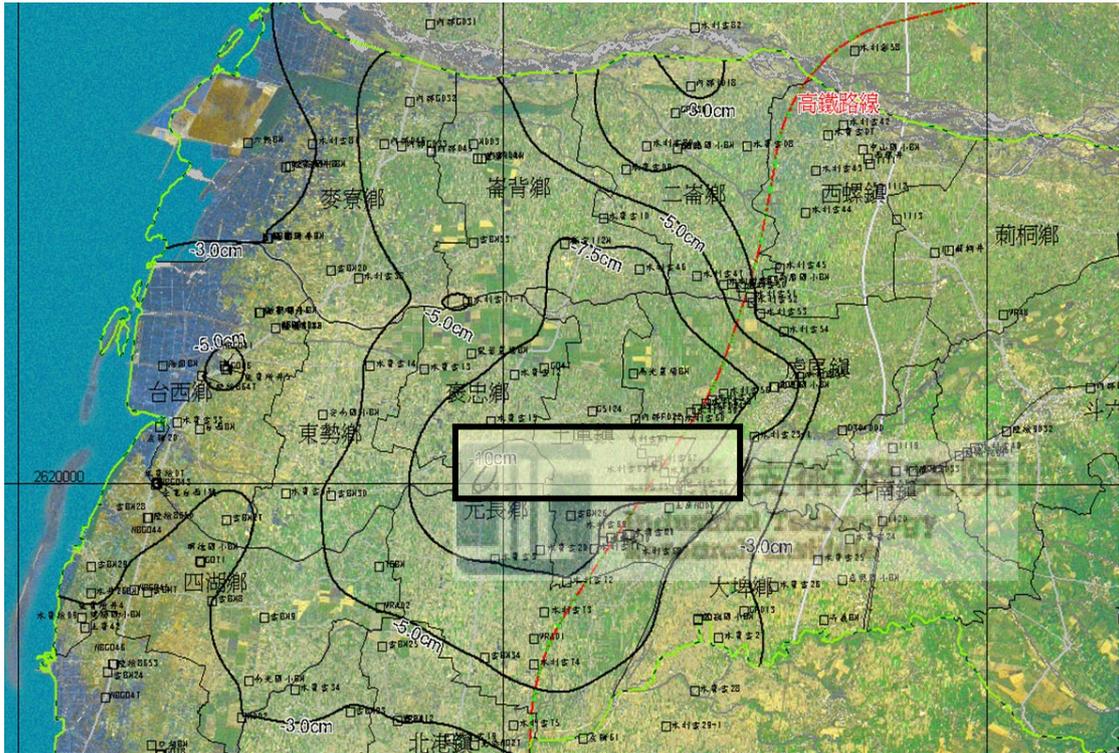


圖 4-1 實驗區年平均地層下陷速率圖(經濟部水利署，2008)

地層下陷量的分析是以 2007 年與 2008 年兩年點雲資料進行高程比對，2007、2008 年空載光達掃瞄相關資料詳表 4-1。

表 4-1 2007、2008 年空載光達測量之相關統計資料

項目	2007.2.4	2008.3.16
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)	779,824	785,522
平均高程 (公尺)	33.56	33.39
平均反射強度	14.2	8.4

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 2×10 公里的測區劃分為 5×5m 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

分別完成上述兩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 年所有網格面計算成果分別輸出至二個成果檔案，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 年空載光達掃瞄具 4.6、3.0 公分的內部精度，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 年空載光達掃瞄具 4.6、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會逐年衰減，2007、2008 年的平均反射強度並不同（表 4-1、圖 4-4、圖 4-5），本研究將 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。

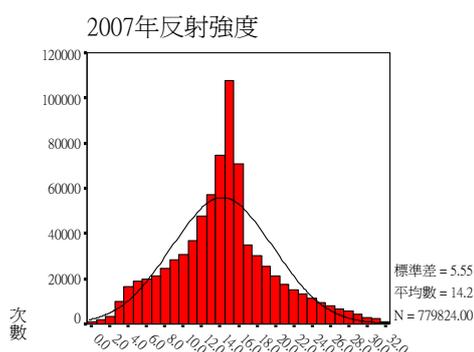


圖 4-4 2007 年反射強度分布圖

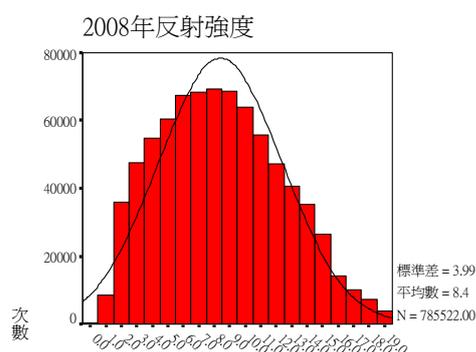


圖 4-5 2008 年反射強度分布圖

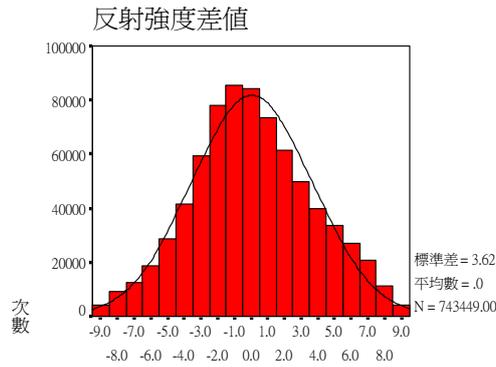


圖 4-6 2007、2008 年反射強度差值統計圖

- 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

當前後兩年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

反射強度差異取 20%、坡向差異取 20%、坡度差異取 2 度以內是經由實驗結果所得之試驗值，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。

4.4 下陷量成果

研究實驗採 4 種方式萃取監測面比較兩年間的高程差異，測試結果分別說明如下：

4.4.1 不考慮是否為穩固監測網格面的高差成果

將測區劃分為 5×5m 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 個監測網格面，平均高程差為 -13.5 公分。由於高差含有一些異常數據(可能為填土區或開挖區)，導致高差分佈的統計圖範圍有過大的情況(如圖 4-8)，因此取 95% 的信賴區間排除異常數據，以 2.5% 及 97.5% 的位數分別為 -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 4-9)，共計有 98,186 個監測網格面，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)。

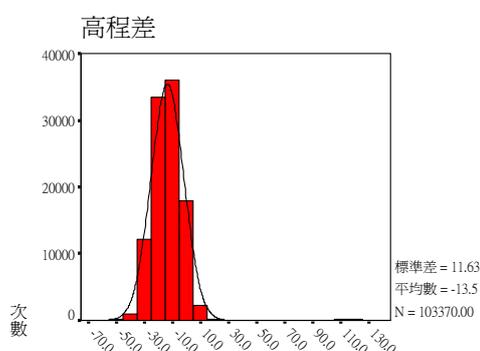


圖 4-8 不考慮是否為穩固監測面高差統計

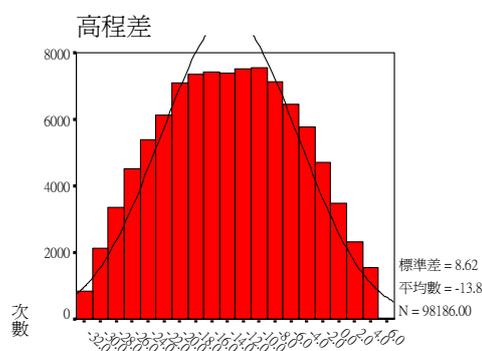


圖 4-9 95%信賴區間的高差統計

4.4.2 萃取穩固監測網格面的高差成果

將測區劃分為 5m×5m 網格，且坡度在 5 度以內，擬合平面精度在 4.6 公分以內，擬合平面前後兩年之 a、b 的係數比(即坡向差異約制)在 80%~120% 之間(差異在 20% 之內)，二空間平面夾角(即坡度差異約制)在 2 度以內，前後兩年之平均反射強度差異在 20% 以內，且高程差以 -32.1 公分及 5 公分為範圍來萃取監測網格面，並套繪於正射影像上以人工判定監測網格面是否為穩固監測面，此為萃取法 1，其結果詳見表 4-2。

由上述萃取出平坦監測網格面套繪至實驗區正射影像圖上，經人工判斷穩固監測面大致可區分為反射強度 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，再組合此門檻值得萃取法 2、3、4，萃取結果詳見表 4-2。

表 4-2 不同條件監測面萃取與計算結果

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			
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	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%
平均高程差 (13.3 月)	-15.0 公分	-10.9 公分	-19.6 公分	-12.6 公分
平均高程差 (12 月)	-13.5 公分	-9.8 公分	-17.7 公分	-11.4 公分
穩固網格面統計圖	圖 4-10	圖 4-11	圖 4-12	圖 4-13
穩固網格面分佈圖	圖 4-14	—	—	圖 4-15

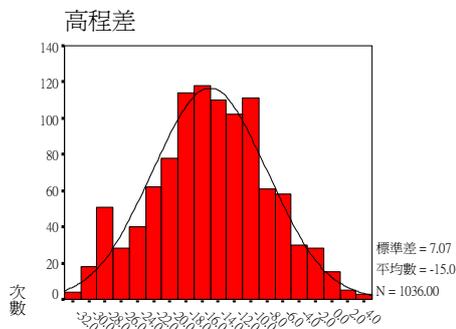


圖 4-10 萃取法 1 高程差統計圖

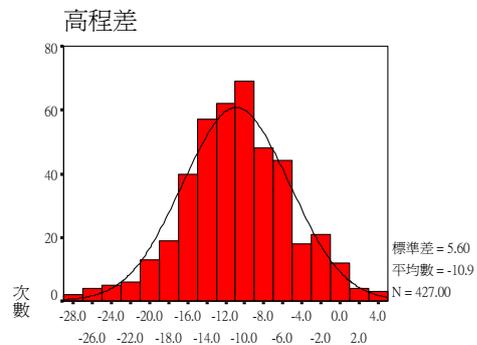


圖 4-11 萃取法 2 高程差統計圖

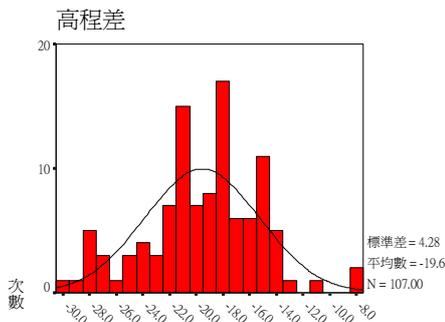


圖 4-12 萃取法 3 高程差統計圖

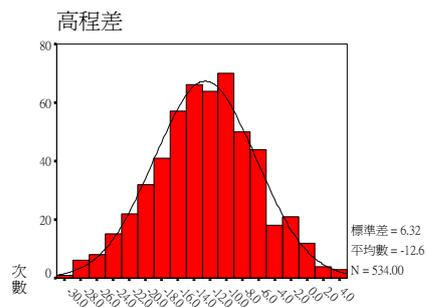


圖 4-13 萃取法 4 高程差統計圖

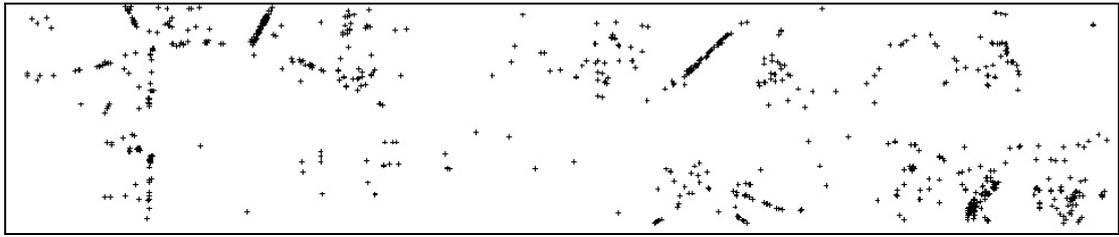


圖 4-14 萃取法 1 穩固網格面分佈情況

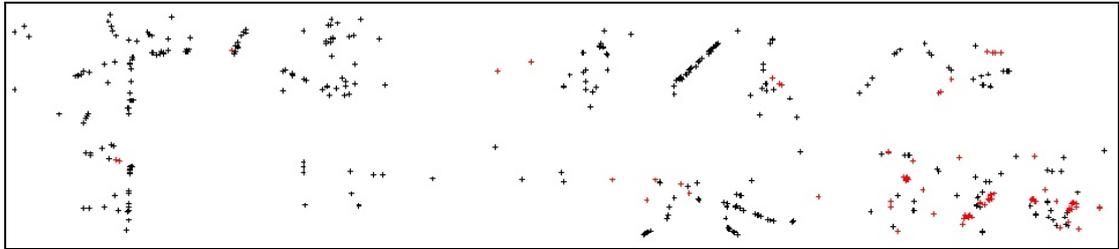


圖 4-15 取法 4 穩固網格面分佈情況

4.4.3 以低反射強度萃取監測網格面的高差成果

2008 年經濟部水利署雲林地區位於本實驗區內的水準測量檢測換算成年下陷量，實驗區內水準點最大沉陷量為 9.3 公分，而上述萃取法 3 反射強度較強的萃取面其兩年間的高程差為 17.7 公分，差異達到 8.4 公分。由於水準測量係長期觀測且精度較高，因此推測反射強度較強的數據是否含有某種系統誤差。根據 Abshire *et al.* (1994) 研究顯示一般光達常見的雷射測距回波感應器偵測時間的方法，包括 50% Rise time point、Peak、Center of Area、Mean、Mid point、Threshold 等方法（詳圖 4-16），而各個方法的優劣取決於地形複雜度與反射強度的變化而定（王滙智，2007）。

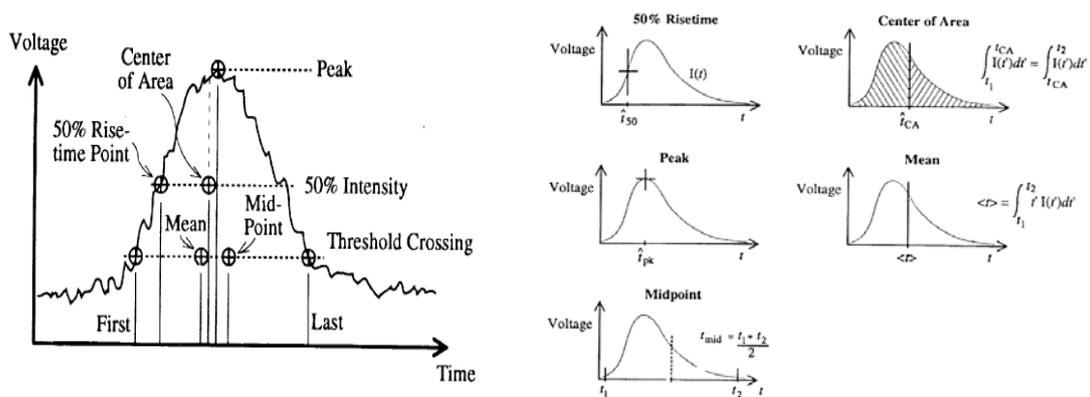


圖 4-16 光達回波感應器偵測時間方法示意圖（Abshire *et al.*, 1994）

由於 2008 年 ALTM 3070 儀器的雷射發射強度較 2007 年有衰減現象且並未予以校正調整，因此假設在雷射光速不變的情況下，反射強度（能量）不同將造成反射波的不同（光速=波長×頻率，能量與頻率成正比），如此可能會造成回波偵測時間的誤差，由

兩年高程差異偏大的結果推估，可能是由於高反射強度造成雷射測距回波感應器偵測時間較低反射強度為早，導致時間縮短（距離縮短）以致 2007 年的高程相對偏高。

為減少反射強度以外的因素干擾高程數據，今以萃取法 1 萃取出 1645 個穩固擬合面的高程差與 2007 年原始反射強度（未做比例改正）、2008 年反射強度及反射強度差異（2007 年原始反射強度值- 2008 年反射強度）進行相關係數的檢定，以 SPSS 的皮爾森（Pearson）相關係數檢定結果如表 4-3。

表 4-3 高程差與反射強度相關係數表

		高程差	2007原始 反射強度	2008 反射強度	反射強度差異
高程差	Pearson Correlation	1	-.580**	-.537**	-.573**
	Sig. (2-tailed)		.000	.000	.000
	N	1645	1645	1645	1645
2007原始 反射強度	Pearson Correlation	-.580**	1	.970**	.913**
	Sig. (2-tailed)	.000		.000	.000
	N	1645	1645	1645	1645
2008反射強度	Pearson Correlation	-.537**	.970**	1	.785**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000		.000
	N	1645	1645	1645	1645
反射強度差異	Pearson Correlation	-.573**	.913**	.785**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	
	N	1645	1645	1645	1645

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

由表 4-3 可知，高程差與 2007、2008 反射強度及兩年的反射強度差異皆顯著地（ $p=0.000<0.05$ ）呈現中度負相關，相關係數值分別為-0.580、-0.537、-0.573，亦即反射強度及反射強度差值越大，高程差的數值會越小（亦即沉陷量越大）。

今再將 2007（原始反射強度值）、2008 年的反射強度取平均值，以 1645 個平均反射強度的平均數 8.7 區分成高、低兩組反射強度，並分別與高程差做相關係數檢定，檢定結果如表 4-4、及表 4-5。另將 1645 個反射強度差異值以平均數 4.0 區分成高、低兩組反射強度差異，並分別與高程差做相關係數檢定，檢定結果如表 4-6、表 4-7。

表 4-4 高程差與高反射強度相關係數表

		高程差	高反射強度
高程差	Pearson Correlation	1	-.381**
	Sig. (2-tailed)		.000
	N	831	831
高反射強度	Pearson Correlation	-.381**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	831	831

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

表 4-5 高程差與低反射強度相關係數表

		高程差	低反射強度
高程差	Pearson Correlation	1	-.089*
	Sig. (2-tailed)		.011
	N	814	814
低反射強度	Pearson Correlation	-.089*	1
	Sig. (2-tailed)	.011	
	N	814	814

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

表 4-6 高程差與高反射強度差異相關係數表

		高程差	高反射強度差異
高程差	Pearson Correlation	1	-.352**
	Sig. (2-tailed)		.000
	N	823	823
高反射強度差異	Pearson Correlation	-.352**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	823	823

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

表 4-7 高程差與低反射強度差異相關係數表

		高程差	低反射強度差異
高程差	Pearson Correlation	1	-.170**
	Sig. (2-tailed)		.000
	N	822	822
低反射強度差異	Pearson Correlation	-.170**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	822	822

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

由上述高程差與高、低反射強度及高、低反射強度差異相關係數的計算結果可知，高程差與高反射強度、低反射強度、高反射強度差異及低反射強度差異之相關係數值分別為-0.381、-0.089、-0.352及-0.170，且檢定結果皆為顯著（ $p < 0.05$ ），其相關係數成果皆較未分組前的成果為差，研判原因可能為高程差與反射強度是屬於非線性的關係，因此分組後的相關係數並未如預期的提高，但分組檢定後可觀察出相關係數還是約略呈現出大小不同的情形，也就是高反射強度（ $r = -0.381$ ）相關係數的影響大於低反射強度（ $r = -0.089$ ），高反射強度差異（ $r = -0.352$ ）相關係數的影響大於低反射強度差異（ $r = -0.170$ ），亦即採用低反射強度或低反射強度差異的成果應較不易受到反射強度影響。

今再以前述萃取法 1 取得之 1645 個網格面其反射強度 8.7 以上的高差平均值與 8.7 以下的高差平均值做平均數t檢定來觀察反射強度的影響程度，結果也顯示出兩組高程差平均值的確有顯著（ $p = 0.000 < 0.05$ ）的差異，其差異量為 8.2 公分，以SPSS檢定結果如表 4-8、表 4-9。

表 4-8 樣本統計量 (公分)

組別	個數	平均數	標準差	平均數的標準誤
反射強度 8.7 以上	831	-18.5673	6.49258	.22523
8.7 以下	814	-10.3690	5.88405	.20636

表 4-9 平均數相等的 t 檢定 (公分)

高程差	變異數相等的 Levene 檢定		平均數相等的 t 檢定						
	F 檢定	顯著性	t	自由度	顯著性 (雙尾)	平均差異	標準誤差異	差異的 95% 信賴區間	
								下界	上界
假設變異數相等	5.509	.019	-26.809	1644	.000	-8.2	-0.31	-8.8	-7.6
假設變異數不等			-26.838	1632.5	.000	-8.2	-0.31	-8.8	-7.6

由於 2007 年的高平均反射強度空載光達高程可能較 2008 年的低平均反射強度空載光達高程相對偏高的影響，導致整體沉陷量偏大，因此若採用低反射強度且低反射強度差異的網格面成果進行高程差分析，由於高差受到反射強度 ($r = -0.089$) 及反射強度差異 ($r = -0.170$) 的影響較小，其成果應能避免高反射強度及高反射強度差異的影響。

今再次以萃取法 1 的 1645 個網格面，以反射強度在 8.7 以下且反射強度差異在 4.0 以下的條件下共萃取出 717 個監測面，並以人工過濾不穩固的網格面後，共計有 474 個穩固監測面，其高程差平均值為 -11.3 公分，年平均下陷量為 10.2 公分，此結果與上述萃取法 2 年平均下陷量 9.8 公分結果相近，但萃取穩固監測面的正確率僅為 66%，與萃取法 1 的 63% 相近。低反射強度且低反射強度差異監測面高程差統計結果如圖 4-17。

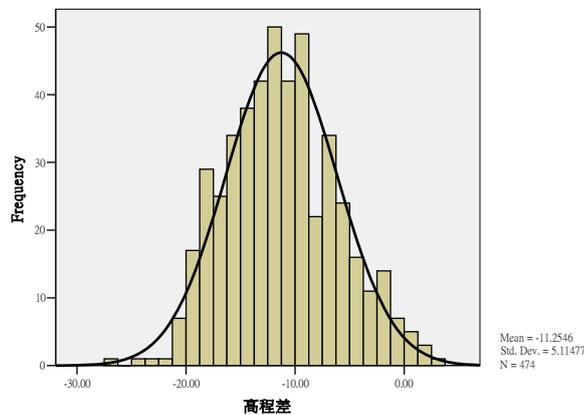


圖 4-17 低反射強度且低反射強度差異監測面高程差統計圖

4.4.4 以道路範圍萃取監測網格面的高差成果

雖然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兩年的反射強度改正一致後，穩固監測面的萃取正確率已可達到 80%。今為提高穩固監測面萃取的正確率，不以反射強度而以指定道路範圍的方式來萃取穩固監測面，也就是以道路中心線坐標及其路寬範圍內符合精度及坡度的監測面高差來計算地層

的下陷量。首先於ArcGIS軟體內展繪測區內蒐集而來地形圖的道路中心線，並以Buffer功能設定道路範圍，為簡化作業，不同道路寬度使用相同的Buffer寬度設定，然後萃取出座落於道路範圍內的監測網格面。理論上，當道路中心線坐標正確且buffer寬度設定合理，符合大多數的道路寬度時，所有座落於Buffer內的網格面皆應都是穩固的道路監測網格面，也就是萃取正確率應該是 100%，但經由套繪地形圖道路中心線與航空正射影像圖可發現道路中心線與實地有所差異，在不重新繪製道路中心而使用原地形圖資料的情況下，不同道路寬度設定，其道路監測網格面的萃取率如表 4-10，其中萃取法 5 以Buffer寬為 4m的高程差統計如圖 4-18。

表 4-10 不同 Buffer 設定道路寬度萃取監測面與計算結果

項目 \ 萃取法	5	6	7	8
平面坡度	5 度以內			
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			
平均反射強度約制	無			
Buffer 寬度	4m	10m	15m	30m
自動萃取網格數量	609 個	877 個	959 個	1138 個
經人工辨識網格面位於道路內之數量	547 個	770 個	811 個	799 個
正確率	90%	88%	85%	70%
平均高程差 (13.3 月)	-12.6 公分	-13.1 公分	-13.3 公分	-13.3 公分
平均高程差 (12 月)	-11.4 公分	-11.8 公分	-12.0 公分	-12.0 公分

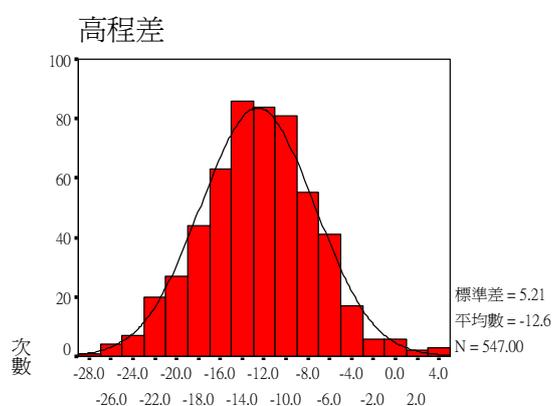


圖 4-18 4m 道路範圍內監測網格面高程差統計圖

以道路範圍萃取道路監測面，理論上正確萃取率可達 100%，但由於道路坐標與實地現況的誤差，在不重新繪製道路中心線的情況下以致無法達到 100% 的正確萃取率，經由測試不同的 Buffer 寬度，以 4m 寬（中心線兩側各 2m）可達到 90% 的正確萃取率，其高差成果為年下陷量 11.4 公分，但此正確率將會受到不同地區、不同精度地形圖的影響而有所不同。如再將上述萃取出來的監測網格面以反射強度差異 20% 以內及反射強度 8.6 以下兩條件過濾，可得結果如表 4-11。

表 4-11 指定道路範圍+反射強度萃取結果

項目 \ 萃取法	5	9	10
平面坡度	5 度以內		
平面精度	4.6 公分以內		
高程差範圍 (95%)	-32.1 公分~5.0 公分		
平面係數差異 (坡向差異)	20% 以內		
平面坡度差異	2 度以內		
Buffer 寬度	4m		
平均反射強度差異	無	20%	20%
平均反射強度分類	無	無	5~8
萃取網格數量	547 個	234 個	145 個
平均高程差 (13.3 月)	-12.6 公分	-12.0 公分	-11.0 公分
平均高程差 (12 月)	-11.4 公分	-10.8 公分	-9.9 公分

萃取法 9 係萃取法 5 剔除兩年間反射強度差異較大的數據，因反射強度差異較大有可能是因地形地物改變所造成，排除此一可能影響高差的因素後，其結果是年平均下陷量 10.8 公分。

萃取法 10 係萃取法 9 再過濾出反射強度 5~8 的數據，此萃取法 10 可以視為萃取法 2 與萃取法 5 的交集，而其年平均下陷量 9.9 公分的成果與萃取法 2 年平均下陷量 9.8 公分相近。因此如在地形圖精確的情況下，以指定道路範圍方式及 Buffer 4m 來萃取反射強度 5~8 且反射強度差異在 20% 以內的網格面應該可以達到正確率 100%，即使以現有具誤差的地形圖道路中心坐標及 Buffer 4m 來萃取也可以達到 90% 的正確率，此法比僅以反射強度分類來萃取穩固面的方式具有較高的正確率和相同的成果。

由於萃取法 9 與萃取法 10 的成果介於萃取法 2 與萃取法 5 之間，因此以下章節有關下陷量的檢核，將以萃取法 2（以反射強度萃取）與萃取法 5（以 4m 道路範圍萃取）為主，萃取法 9 與萃取法 10 的檢核結果應介於萃取法 2 與萃取法 5 之間。

4.5 下陷量檢核

地層下陷量的檢核係比對經濟部水利署 2008 年雲林地區位於實驗區內水準點的沉陷量及下陷等值圖成果，而本研究地層下陷成果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 2 及萃取法 5 成果分別與前述成果進行比較，茲說明如下：

4.5.1 2008年雲林地區水準點沉陷紀錄的比對

實驗區內及附近計有經濟部水利署 12 個水準點（經濟部，2008a）其週遭有點雲資料可比對，分佈情形詳如表 4-12，分別於 2007 年 8 月及 2008 年 5 月檢測高程，由於水準點範圍無法取出符合平面精度的擬合面供比較，因此以水準點坐標半徑 1 公尺以內的點雲兩年間平均高程差與水準點兩年間高程差做比較，其中有三個水準點因半徑 1 公尺內的點雲平均高程差異太大（RMSE 在 3 公尺以上）且其平均高程差與水準點高程差的差異太大（差異在 40 公分以上）捨去不用，共計有 9 個比較值如圖 4-19。



圖 4-19 測區內水準點分佈圖

表 4-12 點雲高程差與水準點高程差比較表（單位：公尺）

點位	N	E	檢測時間與高程 (m)		水準點 高程差	水準點 一年高差	1m 半徑內點 雲平均高差
			2007.08	2008.05			
1 土庫鎮農會	2619746.205	188173.803	17.81369	17.75537	-0.058	-0.078	-0.009
2 土庫 NO05	2618886.189	187691.790	17.23329	17.17441	-0.059	-0.079	-0.265
3 台糖鐵路 2	2620971.213	186563.770	17.22781	17.16281	-0.065	-0.087	-0.118
4 田園小吃部	2620680.211	186967.774	17.38430	17.31798	-0.066	-0.088	-0.023
5 18.5K	2620501.210	187174.776	17.08797	17.02210	-0.066	-0.088	0.055
6 石廟	2620248.208	187493.779	16.95328	16.88338	-0.070	-0.093	-0.097
7 蔥仔寮	2618794.136	179946.653	9.93973	9.87797	-0.062	-0.082	-0.206
8 土庫國中 GPS 樁	2620556.215	187767.786	16.63541	16.56911	-0.066	-0.088	-0.263
9 土庫國中監測井	2620553.215	187757.786	17.59455	17.52728	-0.067	-0.090	-0.259
					平均數：	-0.086	-0.132

水準點資料來源：2008 年經濟部地層下陷水準檢測及相關分析計畫

點雲高程差與水準點高程差比較分析說明如下：

1. 點雲與水準點平均高程差的較差為 -4.6 公分。

2. 以SPSS成對樣本t檢定兩平均數的差異（表 4-13）並不顯著（ $p=0.297>0.05$ ），但觀察每個水準點高差及其位置的點雲高差比較，編號 2 的 18.6 公分差異最大，編號 6 的 0.4 公分差異最小，如以長期監測及精度較高的水準點高差為正確值，空載光達點雲高差平均值與水準點高差平均值的差異達到 4.6 公分。因此平均值的t檢定雖不顯著，有可能是因為二者平均高程差的較差離散性偏大（表 4-13標準差為 12.3 公分）所造成。
3. 由於水準點坐標來源為經濟部水利署，其位置坐標係量取 1/5000 航照圖而得，實際展繪於正射影像上時，發現編號 3、4、5、6 點位落在不穩固地區的農田中，距離一般水準點可能位居於道路旁的位置尚有 10~40 公尺的距離，因此該處點雲的高差與實際水準點位置高差將會有所差異。
4. 編號 2、7、8、9 點的附近點雲平均反射強度大於 8.6（詳如表 4-14），有鑑於反射強度較強的高程有可能影響高程，因此點雲的高差成果可能會有較大的偏差。
5. 綜合上述因素，本檢核雖以 t 檢定二者平均值差異並不顯著，但觀察個各點位的檢核成果卻並不理想。

表 4-13 水準點-點雲高差成對樣本檢定（公分）

	成對變數差異					t	自由度	顯著性 (雙尾)
	平均數	標準差	平均數的 標準誤	差異的95%信賴區間				
				下界	上界			
成對 點雲-水準	-4.574	12.289	4.099	-14.027	4.879	-1.116	8	0.297

表 4-14 點雲平均反射強度

編號	點位	反射強度		
		96 原始	96 改正	97
1	土庫鎮農會	9.4	5.6	5.1
2	土庫 NO05	27.0	16.2	10.3
3	台糖鐵路 2	11.4	6.8	11.1
4	田園小吃部	7.8	4.7	4.2
5	18.5K	5.2	3.1	6.6
6	石廟	3.9	2.3	14.2
7	蔥仔寮	22.4	13.4	15.8
8	土庫國中 GPS 樁	28.7	17.2	20.9
9	土庫國中監測井	28.9	17.3	19.1

4.5.2 2008年雲林地區下陷等值圖的比對

4.5.2.1 萃取法2高差成果比較

利用經濟部水利署雲林地區於 2007 年 8 月至 2008 年 5 月水準點檢測高程差（表

4-15) 繪製的地層下陷等值圖 (圖 4-20), 為便於分析, 將等值線換算成年下陷且加密為 0.5cm 間距的等值圖 (圖 4-21)。長方框表示實驗區範圍, 與本研究萃取法 2 萃取出之擬合面高差下陷等值圖做比較, 由於萃取法 2 擬合面高差下陷等值圖萃取出之網格眾多, 造成實驗區內的等值線過於複雜, 無法觀察出區域地層下陷的走勢, 因此再將實驗區以 1000m×1000m 大小劃分為 20 個網格, 將其網格內所有 5m×5m 網格高差平均後, 以 Autodek Land Desktop 製作 TIN, 並繪製出上述擬合面高差下陷等值圖 (圖 4-22)。

表 4-15 2007 年 8 月至 2008 年 5 月水準點檢測高差成果

樁號	點位	檢測時間與高程 (m)			97-96	97-96
		95 年 10 月	96 年 08 月	97 年 05 月	沉陷	換算年沉陷
水資雲 16	內山國小	9.88676	9.83679	9.77683	-0.060	-0.080
水利雲 37	土庫鎮農會	17.85614	17.81369	17.75537	-0.058	-0.078
水利雲 62	田園小吃部	17.43330	17.38430	17.31798	-0.066	-0.088
水利雲 63-1	18.5K	NA	17.08797	17.02210	-0.066	-0.088
水利雲 64	石廟	17.00505	16.95328	16.88338	-0.070	-0.093
水利雲 65	槽化島	17.10322	17.05245	16.98450	-0.068	-0.091
水利雲 66	建國路一號橋	18.81349	18.76387	18.69763	-0.066	-0.088
土庫國中 GPS 樁	土庫國中 GPS 樁	16.68396	16.63541	16.56911	-0.066	-0.088
土庫國中監測井	土庫國中監測井	17.64418	17.59455	17.52728	-0.067	-0.090
水利雲 61	台糖鐵路 2	17.27540	17.22781	17.16281	-0.065	-0.087
土庫 NO05	土庫 NO05	17.27298	17.23329	17.17441	-0.059	-0.079
THSRYL15-1	YL15	17.98668	17.94091	17.87679	-0.064	-0.085
內部 I027	蔥仔寮	9.99080	9.93973	9.87797	-0.062	-0.082
				平均：	-0.064	-0.086

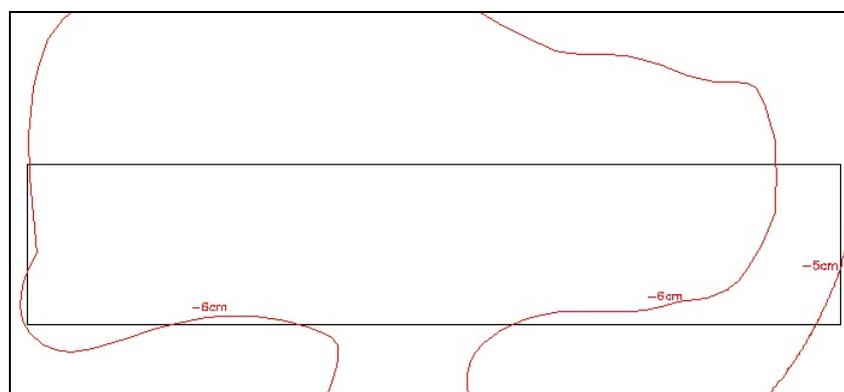


圖 4-20 2008 年經濟部水利署於實驗區附近原始下陷等值圖

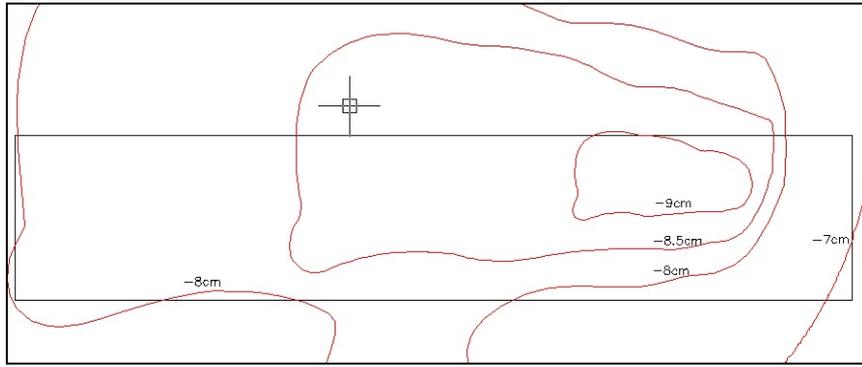


圖 4-21 2008 年經濟部水利署於實驗區附近換算年下陷等值圖

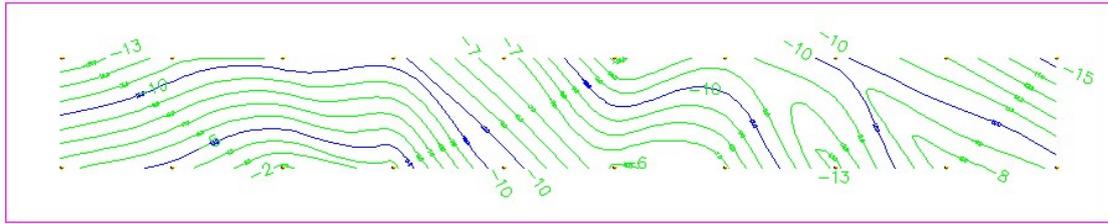


圖 4-22 萃取法 2 高差成果於實驗區繪製下陷等值圖

套繪圖 4-21 與圖 4-22 成圖 4-23，計算圖實驗區內圖 4-21 的 -9 公分、-8.5 公分、-8 公分等值線與圖 4-22 等值線相交的點，共計 51 點（詳表 4-16），並以 SPSS 成對樣本 t 檢定兩者差異（詳表 4-17）結果有顯著的不同 ($p=0.000 < 0.05$)，平均數差異為 1.3 公分，標準差為 2.1 公分。

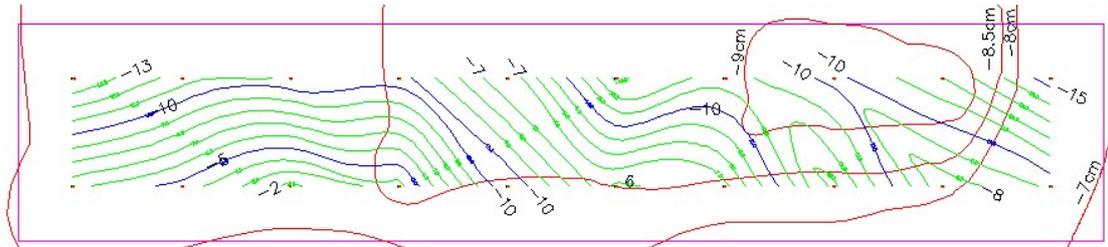


圖 4-23 經濟部水利署與萃取法 2 下陷等值線套繪圖

表 4-16 萃取法 2 高差等值線相交點數紀錄統計表

水利署等高線(公分)	萃取法 2 等高線 (公分) / 交點數											共計
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
-8	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	7
-8.5	1	-	2	3	6	6	6	3	3	3	-	33
-9	-	-	-	-	-	2	2	4	3	-	-	11
-8.5±0.3	-9.8±2.1											51

表 4-17 萃取法 2 高差等值線成對樣本檢定 (公分)

	成對變數差異					t	自由度	顯著性 (雙尾)
	平均數	標準差	平均數的 標準誤	差異的 95% 信賴區間				
				下界	上界			
成對 A - B	1.30	2.10	0.29	0.71	1.90	4.424	50	0.000

A：經濟部水利署等值線。 B：萃取法 2 擬合面高差等值線

4.5.2.2 萃取法 5 高差成果比較

利用經濟部水利署雲林地區於 2007 年 8 月至 2008 年 5 月水準點檢測高程差及地層下陷等值圖，換算成年下陷等值圖 (圖 4-21)，與本研究萃取法 5 萃取出之擬合面高差下陷等值圖套繪做比較，比照上述 (一) 的作法，將實驗區以 1000m×1000m 大小劃分為 20 個網格，將其網格內所有 5m×5m 網格高差平均後，繪製出上述擬合面高差下陷等值圖，並與圖 4-21 套繪成圖 4-24，計算圖 4-21 內的 -9 公分、-8.5 公分、-8 公分等值線與圖 4-24 等值線相交的點，共計 47 點 (詳表 4-18)，並以 SPSS 成對樣本 t 檢定兩者差異 (詳表 4-19) 結果有顯著的不同 ($p = 0.000 < 0.05$)，平均數差異為 2.9 公分，標準差為 2.8 公分。

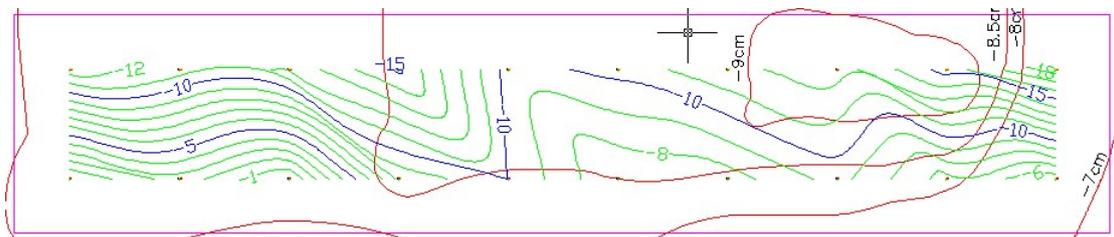


圖 4-24 經濟部水利署與萃取法 5 下陷等值線套繪圖

表 4-18 萃取法 5 高差等值線相交點數紀錄統計表

水利署等高線 (公分)	萃取法 2 等高線 (公分) / 交點數											共計
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
-8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11
-8.5	1	5	4	4	2	2	2	2	1	1	1	25
-9	-	-	-	2	4	1	1	1	1	1	1	11
-8.5±0.3	-11.4±2.8											47

表 4-19 萃取法 5 高差等值線成對樣本檢定 (公分)

	成對變數差異					t	自由度	顯著性 (雙尾)
	平均數	標準差	平均數的 標準誤	差異的 95% 信賴區間				
				下界	上界			
成對 A-B	2.93	2.79	0.41	2.11	3.75	7.2	46	0.000

A：經濟部水利署等值線。 B：萃取法 5 擬合面高差等值線

4.5.3 小結

點雲擬合面高差成果的檢核是以兩年的點雲高差及穩固監測網格面高差與實驗區內的 (1) 水準點兩年間高差及 (2) 下陷等值線作比較。水準點附近的點雲高差和水準點高差的平均數差異為 4.6 公分，成對樣本 t 檢定的差異雖不顯著，但個別觀察數據並比較差異，其中較差最大的達到 18.6 公分，究其原因可能是受到水準點位置誤差及點雲反射強度較大的影響，導致個別觀察的比較成果不盡理想。

而下陷等值線的比較是以萃取正確率較高的萃取法 2 及萃取法 5 的高差成果與經濟部水利署於該區的下陷等值線作比較，萃取法 2 及萃取法 5 的高差成果與經濟部水利署下陷等值線比較，較差僅分別為 1.3 公分及 2.9 公分，但在平均數標準差只有 2.1 公分及 2.8 公分的情況下，成對樣本 t 檢定結果達到顯著的差異，不過等值線的平均值較差分別為 1.3 公分及 2.9 公分卻較水準點的 4.6 公分差異為小。

4.6 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，98,186 個監測網格面的年平均沉陷量為 12.4 公分。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向、坡度夾角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% 的穩固網格面，計算得年平均下陷量為 13.5 公分。
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)，可提高穩固監測網格面萃取正確率至 80%，而所計算的年平均下陷量為 11.4 公分，其中以反射強度萃取出道路監測網格面為主的年平均下陷量為 9.8 公分。
4. 萃取時針對監測網格面的精度與坡度、坡向，並取低反射強度以降低高反射強度的影響後，年平均下陷量為 10.2 公分，但其穩固監測網格面萃取正確率卻不高。

5. 萃取時針對監測網格面的精度與坡度、坡向，並以指定道路為範圍的萃取法 5 可提高萃取正確率至 90%，其年平均下陷量為 11.4 公分。
6. 上述五種分析地層下陷量的成果雖均較雲林地區 2008 年實驗區內水準點平均下陷量 8.6 公分為大，但由於地面 GPS 主站 PA01、PA02 兩年間觀測之高程差已達到 9.0 公分，且在點雲精度（內部）為 4.6 公分的情況下，上述方法所計算出的下陷量皆在 9.0 ± 4.6 公分以內。
7. 以反射強度過濾柏油道路監測面所得之年平均下陷量 9.8 公分（表 4-16 萃取法 2），其高程差異與主站 GPS 兩年間高程差約 9.0 公分差異較接近，原因可能為點雲於航帶平差時，航帶共軌面的選取大多以道路為主，且其屬於低反射強度範圍，導致道路面的高程成果較其他監測面的來得穩定所致。其成果與測區內 2008 年經濟部水利署雲林地區的 9 個水準點高程差平均下陷量 8.6 公分較差為 1.2 公分，此差值和其下陷等值線與實驗區的下陷等值線的比較差異 1.3 公分近似，顯然以此法來萃取監測面，其成果和長期監測的數據較為接近。
8. 反射強度高低可能會影響空載光達測量的高程成果，而以低反射強度萃取穩固監測網格面的結果與萃取法 2（以反射強度分類出 5~8 的柏油路面）結果相近，但萃取正確率卻不如後者，因此萃取法 2 具有避免高反射強度可能造成的過大誤差的缺點與萃取穩固監測網格面高正確率的優點。
9. 以道路範圍萃取穩固監測面的方法理論上可達到 100% 的正確率，但受到既有地形圖誤差的影響，本研究實驗區內以 Buffer 寬度 4m 的設定萃取可達到 90% 的正確率，惟其成果可能還是受到反射強度的影響，與實驗區的下陷等值線的比較差異達到 2.9 公分，相較於以反射強度 5~8 分類的萃取法 2 的 1.3 公分成果差異為大。
10. 引用之 2007 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 2007 年點雲成果，2007、2008 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及其平均高程差的影響並不大。
11. 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，除兩側翼牆妨礙空載光達的掃瞄外，橋面上的道板、道渣與兩側電纜人行道高度均不同（如圖 4-25），導致無法萃取出 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 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或其他方法來進行分析。



圖 4-25 高鐵高架橋面

五、結論與建議

5.1 結論

1. 空載光達點雲成果受到地面 GPS 主站高程測量精度影響甚鉅，為提高空載光達測量精度需限制地面主站與飛航路線保持在 20 公里內的距離情況下，地面主站本身位於地層下陷區內，無法像傳統的高程檢測可從穩定無下陷地區內的水準點開始檢測下陷區內的沉陷情形。而以金門固定站雖可求得主站兩年間的高程差，但由於距離較遠，高程精度相對降低，因此在地面主站受到本身下陷及 GPS 高程測量精度的影響，導致沉陷量的分析較為複雜。
2. 雖然一般空載光達測量高程精度約為 15 公分左右，但在降低飛航高度、縮小掃瞄角度、降低飛航速度等等提高精度的規劃下，的確提高了空載光達測量高程精度至約 5 公分以內，並足以評估實驗區內的地層下陷量。
3. 以網格擬合面的精度、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。如將反射強度改以道路範圍的方式萃取穩固的監測面，理論上可達到 100% 的正確率，而以本研究使用含有誤差的地形圖也可達 90% 的正確率，因此上述二種方法對穩固監測面萃取的自動化有相當幫助。
4. 不同的萃取方法顯示實驗區內的地層下陷量約在 9.8 公分至 11.4 公分之間，雖較雲林地區長期觀察的下陷量為大，但與 2008 年的下陷等值圖比較，差異僅在 1.3 公分與 2.9 公分之間，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可行。
5. 空載光達測量精度雖不如水準測量及 GPS 測量為高，但由於具有高度機動性，和受天氣影響小的特性，在節省人力、時間和成本的情況下，可瞭解大面積區域地層下陷之趨勢及分佈情況。以本研究實驗萃取出的高程點樣本數在 20km^2

6. 本研究僅以兩年的高程差異進行比較，且受限於引用之 2007 年資料限制及空載光達測量本身精度，導致最後成果與雲林地區的水準測量下陷情況差異稍大。因此將於後續空載光達資料掃瞄計畫中同時施測主站以外之 GPS 高程控制點來約制全區點雲的橢球高，再與 2008 年經 GPS 高程測量約制的全區點雲橢球高程，用相同的演算法進行下陷量分析比較期望能獲取更正確的分析成果。

5.2 建議

1. 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，這有待後續進一步研究測試與分析。
2. 本研究雖僅以空載光達測量獲取的三維空間資料、反射強度及道路範圍來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%和 90%，但統計之樣品數也因此減少許多，如能以更正確的地形圖、最佳化的道路範圍、反射強度及其他萃取參數，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. 由於 2007 年地面缺乏主站以外的橢球高程控制點進行全區高程約制，且 2008 年僅以 4 個橢球高程控制點約制全區後以檢核計算點雲成果的精度，因此本研究並無對二年的全區高程約制後的成果進行比較分析；若能將二年的全區高程約制，且以較多的高程控制點約制全區點雲高程後再進行比較，或許能得到更佳的成果。
4. 本研究實驗區雲林縣元長鄉的沉陷速度約為每年 8.2 公分，雖然目前一般經驗空載光達測量高程精度約為 15 公分，但本次點雲成果精度在適當之飛行掃瞄規畫下已達 5 公分以內，已約略符合彭森祥等人(2001)對觀測精度與觀測期距關係建議之需求，但如果在降低觀測頻率（增加觀測期距）的情況下，以此等精度將更適合應用於地層下陷監測之用，而這仍有待進一步的研究分析與確認。
5. 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 96 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., 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
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、計畫成果自評

由於本計畫第二年蒐集試驗區空載光達精度未經核准，因此調整計畫內工作項目為：

- (1).蒐集經濟部水利署 96 年空載光達資料作為第一時期之空載光達資料並和本子計畫第一年(97 年 3 月)蒐集到空載光達資料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。
- (2).分析各種影響地層下陷量分析的計算模式的可能因素。
- (3).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。
- (4).撰寫第二年之研究成果報告。
- (5).發表研討會論文 1 篇。

預計完成工作項目中均順利完成，且發表兩篇研討會論文(如後附件一)分別是

1. Hsing-Yi Hsieh, Chin-Chung Lee, Shih-Hong Chio, 2009, " Land subsidence monitoring using airborne LiDAR data and relevant auxiliary data ", THE 30th ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING, ACRS2009, CD-Proceedings.
 2. 謝幸宜、李景中、邱式鴻，2009，" 應用空載光達測量技術於地層下陷監測之研究" 第二十八屆測量學術及應用研討會論文集，國立中央大學，中華民國九十八年 8 月。
- 且本子計畫亦是九十八年七月國立政治大學地政學系碩士在職專班李景中之畢業論文畢業論文題目為：空載光達技術在地層下陷監測之研究

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%，研究成果具學

術及應用價值，適合在學術期刊發表且適合申請專利。主要發現在於(1)以空載光達資料進行地層下陷監測時必須拉長觀測間距至少一年半以上且要注意高反射強度所造成下陷量加大之問題，而在拉長觀測間距之情況下以空載光達資料進行地層下陷監測是可行的。(2)將空載光達資料網格化並以網格擬合面的精度、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。如將反射強度改以道路範圍的方式萃取穩固的監測面，理論上可達到 100% 的正確率，而以本研究使用含有誤差的地形圖也可達 90% 的正確率，因此上述二種方法對穩固監測面萃取的自動化有相當幫助。

附件一 研討會論文

1. Hsing-Yi Hsieh, Chin-Chung Lee, Shih-Hong Chio, 2009, " Land subsidence monitoring using airborne LiDAR data and relevant auxiliary data ", THE 30th ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING, ACRS2009, CD-Proceedings.
2. 謝幸宜、李景中、邱式鴻，2009，" 應用空載光達測量技術於地層下陷監測之研究" 第二十八屆測量學術及應用研討會論文集，國立中央大學，中華民國九十八年8月。

Land subsidence monitoring using airborne LiDAR data and relevant auxiliary data

Hsing-Yi Hsieh, Chin-Chung Lee, Shih-Hong Chio
National Chengchi University (Chinese Taipei)
Phone: +8862 2939 3091 #50621, Fax: +8862 2937 9611
Email: 97257024@nccu.edu.tw

KEY WORDS: LiDAR, Point Clouds, Land subsidence, Monitoring

ABSTRACT

Precise leveling has high accuracy for land subsidence monitoring, but it is time-consuming and only profile data can be captured. Airborne LiDAR (Light Detection And Ranging) acquires dense and accurate point clouds on land surface rapidly. This technique can offer the potential for comprehensive analysis of land subsidence. However, the point clouds could be located on unstable terrain objects, and the accuracy of single point in point clouds may not be suitable for the evaluation of land subsidence in regular flight scanning design. After specific flight scanning design, the extraction of point clouds on stable terrain objects, e.g. road surfaces or building rooftops, and accurate elevation determination on the representative location for land subsidence monitoring are necessary. In this study, the test area with 2 km by 10 km will be divided into 5m by 5m sub-grids and each centric elevation of the grid will be calculated by the fitting planar parameters, which is determined by least squares fitting according to the point clouds in each grid. Subsequently, three approaches for acquiring stable monitoring planes will be presented in this study: (1) to classify the point clouds on stable terrain objects by its intensity, (2) to extract the point clouds on road surfaces from the road information in the topographic maps with 1/5,000 scale, (3) to extract the point clouds on rooftops from the building information in the topographic maps with 1/5,000 scale. Finally, the land subsidence between two different periods of airborne LiDAR data from the approaches mentioned above will be evaluated and analyzed based on the collected ground truth.

1. INTRODUCTION

Land subsidence in Yunlin County, an important agricultural area in Taiwan, has caused threats to people's property and civil infrastructures. Therefore, comprehensive and accurate land subsidence monitoring is an important reference for disaster prevention. Currently monitoring approaches for land subsidence can be categorized into 2 classes: surface monitoring and subsurface monitoring. The former contains precise leveling, global positioning system (GPS), differential interferometry SAR (DInSAR), and airborne light detection and ranging (LiDAR), and the latter contains multi level monitoring well.

Among the approaches, DInSAR and airborne LiDAR have the most potential for acquiring comprehensive data for land subsidence automatically. Especially the spatial resolution and the mobility of airborne LiDAR approach are better than DInSAR approach (Table 1), so airborne LiDAR approach will be used for land subsidence monitoring in this study.

Table 1 Comparison Table for Various Monitoring approaches (Adapted from Hwang et al., 2008)

Approach	Precise Leveling	GPS	DInSAR	LiDAR	Monitoring Well
Spatial Resolution	1.5~2 km	10~15 km	25 m	1~4 points/m ²	5~10 km
Survey Frequency	1 year	1 day	35 days	Free	1 month
Vertical Accuracy	0.5~1 cm	0.5~1 cm	2 cm	≤ 15 cm (single point)	0~0.5 cm

2. DATA AND METHODS

In Table 1, the vertical accuracy of airborne LiDAR single point is not as good as other approaches. However, the vertical accuracy of airborne LiDAR single point is affected by flying altitude, aircraft speed, pulse rate, cross strips, and scan rate, etc. Appropriate flight planning and design can promote the vertical accuracy of airborne LiDAR single point to 5 cm (Hsu, 2007). The flight parameters for this study are listed in Table 2, and the test area with 2 km by 10 km locates in Yunlin County. According to the records from Taiwan Water Resource Agency, the average subsidence rate of this area is -8.6 cm/year and the maximum subsidence rate is -9.3 cm/year.

Table 2 Flight and Technical Parameters of Airborne LiDAR Scanning Data

	2007.2.4	2008.3.16	General cases
Total strips	83 (test site)	13 (test site)	Depending on the project requirements
Cross strips	6	3	Depending on the project requirements
Flying altitude (m)	600	600	800 ~ 1200
Aircraft speed (km / hr)	166.7	154	203
Scan angle (°)	± 15	± 15	± 18
Pulse rate (KHz)	50	33	70
Scanning rate (Hz)	43	33	Adjust to other parameters
Average ground swath (m)	322	322	520 ~ 780
30% strips overlap (m)	96	96	156 ~ 234
GPS base station	2 (Average subsidence rate: PA01: -9.4cm/year PA02: -8.8cm/year)		2
Distance between the strips and GPS base stations (km)	< 20	< 20	< 20
Internal accuracy	4.6 cm	3.0 cm	--

The laser footprints between two periods may not be on the same location, and this will cause

some problems in computing the height difference. In addition, according to Crombaghs and Brügelmann (2000), the height differences can be computed as mean differences for groups of minimal 100 points in a specific area to reduce the noise of individual point. The specific area should be flat and smooth, otherwise small planimetric errors might have a large impact on the mean difference. As a result, multiple points in an area are used to get a fitting plane and those fitting planes could supply bases for comparison between two-period data in this study. The followings will describe the approach used in this study.

The spatial resolutions of the point clouds in this study are about 4 points/m². And 5m by 5m sub-grids are used to divide the point clouds first. Second, the point clouds in each sub-grid are used to determine a fitting plane by least squares method. If the standard error of the fitting plane is over 4.6 cm, this plane would not be accepted as possible monitoring plane. Third, the centric elevations of each fitting planes will be used to compute the height difference, and the mean intensity value of the point clouds in a sub-grid is used to represent the intensity value of the fitting plane. Finally, three approaches were used to acquire stable monitoring planes: (1) classifying the point clouds on stable terrain objects by its intensity, (2) extracting the point clouds on road surfaces from the road information in the topographic maps with 1/5,000 scale, (3) extracting the point clouds on rooftops from the building information in the topographic maps with 1/5,000 scale. The study flowchart is illustrated as Fig. 1.

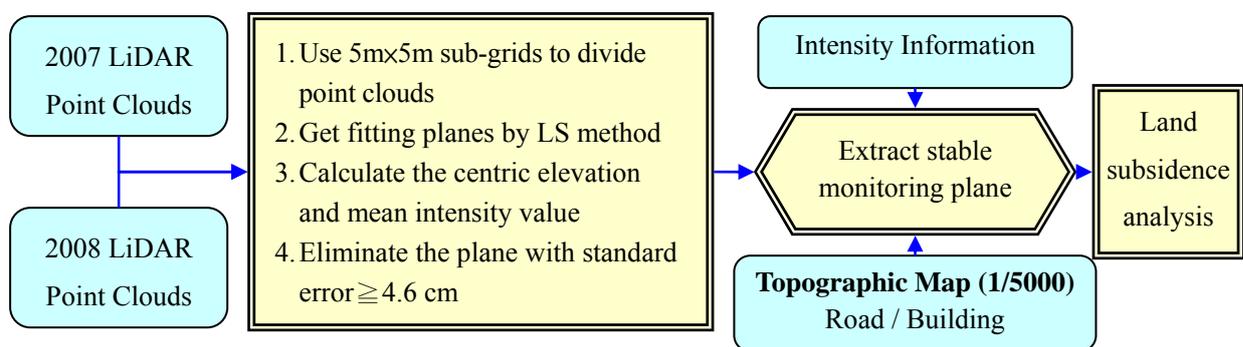


Figure 1 Study Flowchart

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

During the process of evaluating the height differences, 95% confidence interval is used to screen the unstable area out (Fig. 2). Besides, in order to get more reliable stable planes, some thresholds are chosen after trail and error: (1) the slope of a fitting plane should be less than 5°, (2) the change rate in slope of the fitting planes between two periods should be less than 20%, (3) the change rate in aspect of the fitting planes between two periods should be less than 20%, (4) the angle difference of the fitting planes between two periods should be less than 2°. At last, the mean intensity value of the fitting plane and the information in the topographic maps are used to extract the stable monitoring planes. The results are listed in Table 3 and displayed as Fig. 3.

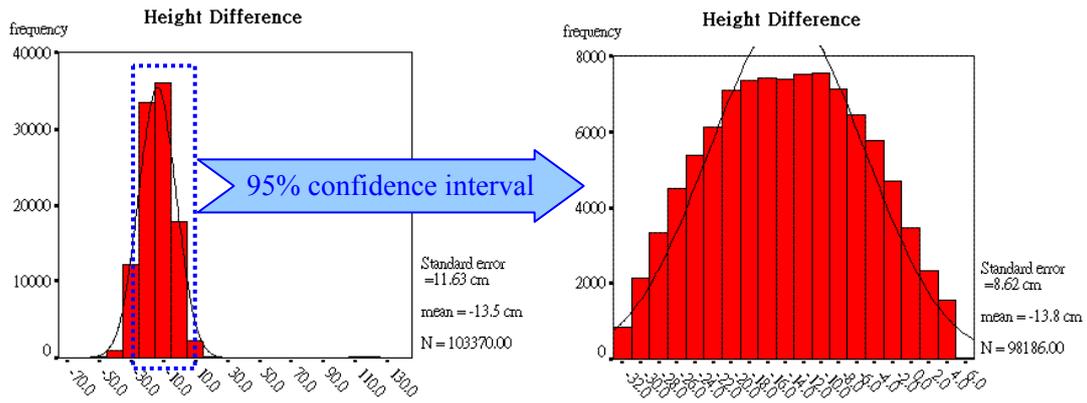


Figure 2 Distribution of the Height Difference

Table 3 Results of Extracting Stable Monitoring Planes by Different Auxiliary Information

Auxiliary Information	Average Intensity Value of the Fitting Plane				Topographic Maps with 1/5,000 Scale		None
	0-70 (all surface features)	5-8 (asphalt roads)	14-18 (man-made structures)	5-8 and 14-18	Road information	Building information	
Used Intensity Value/ Information	0-70 (all surface features)	5-8 (asphalt roads)	14-18 (man-made structures)	5-8 and 14-18	Road information	Building information	--
Specific Threshold	the change rate in intensity of the fitting planes between two periods should be less than 20%				none		none
Amount of Extracting Planes	1645	552	120	672	647	58	3869
Amount of Confirmation	1063	427	107	534	--	--	--
Correct Rate	63 %	77 %	89 %	80 %	--	--	--
Average Subsidence Rate	-13.5 cm/year	-9.8 cm/year	-17.7 cm/year	-11.4 cm/year	-11.3 cm/year	-17.2 cm/year	-12.9 cm/year



(a)Green Point: Extracted by Intensity Value 5-8; Red Point: Extracted by Intensity Value 14-18



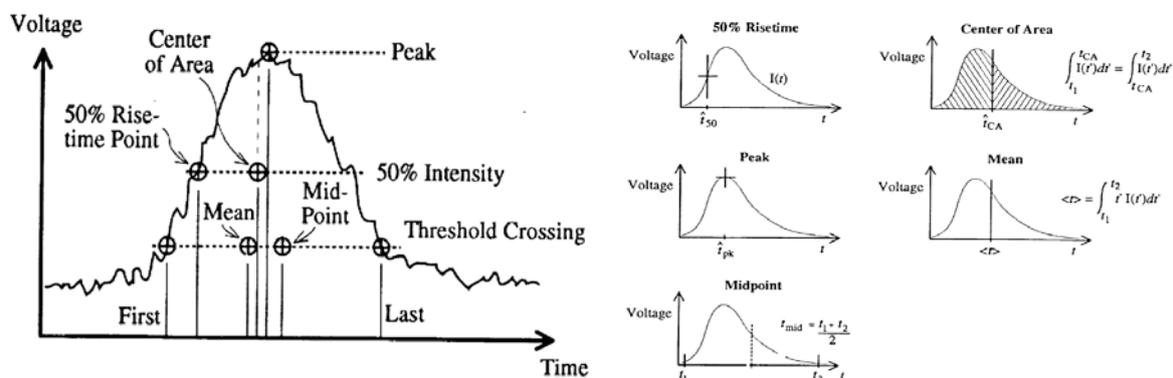
(b)Blue Point: Extracted by Road Information; Magenta Point: Extracted by Building Information

Figure 3 Extracting Results Overlapped on the Orthophotos

Before introducing the specific threshold of intensity value, this study deals with the attenuation of the laser intensity by a multiplication constant. And the correct rate in Table 3 is the ratio of the amount of extracting planes to the amount of confirmation. In the confirming processing, all planes extracted by the intensity value threshold are displayed on the orthophotos. And then, each plane is checked manually. When the information of the topographic maps is used to extract stable planes, the confirming process is cancelled. This is because the accuracy of the orthophotos may be close to or be worse than the accuracy of the topographic maps.

Comparing the results in Table 3 with the subsidence rates of the two GPS base stations (Table 2), and the records of the Water Resource Agency, the results of extracting the stable monitoring planes by the intensity of asphalt roads and by the road information of the topographic maps with 1/5000 scale are closed to the subsidence rates of the GPS base stations and the records. The land subsidence rates resulted from the intensity of man-made structures and the building information of topographic map are almost twice as much as these reference records. During the data processing, diverse noise is eliminated. As far as error source is concerned, the subsidence rates extracted by the intensity of man-made structures and by the building information of topographic maps might include some systematic errors.

The main principle of laser altimetry system is measuring the time delay of a laser pulse between the transmission and return. However, the waveform of the return pulse and the modes of the time estimation would affect the accuracy of time measuring. This could be stated in the Fig. 4 (Abshire et al., 1994). According to Wang (2007), if the time estimation mode adopts Mean or Mid Point method, different intensity may cause errors in elevation. On account of that the original intensity value of the man-made structures and the buildings are higher than the asphalt roads and the roads, the subsidence rates of the buildings might be greater than the roads.



(a) Digitized Waveform with Timing Estimators (b) Waveform Timing Estimators

Figure 4 Waveform and Timing Estimators

4. CONCLUSIONS

This paper applies the LiDAR altimetry data and the relevant auxiliary information to land subsidence monitoring. Three approaches for acquiring stable monitoring planes are presented and discussed: (1) classifying the point clouds by its intensity, (2) extracting the point clouds on road surfaces by using the topographic maps with 1/5,000 scale, (3) extracting the point clouds on buildings by using the topographic maps with 1/5,000 scale.

From the results of the experiment, a flat and stable monitoring surface with lower intensity value, e.g. the asphalt road, can obtain reasonable subsidence rate and provide a more automatic method for land subsidence monitoring. Additionally, a specific surface feature with lower intensity value is a better land subsidence monitoring plane than the feature with higher intensity value, e.g. a man-made structure. There seems to have some systematical error in the result of extracting man-made structures, and the mechanism of LiDAR needs to be discussed more profoundly.

Using relevant auxiliary data, such as the road and building information in the topographic maps, can extract the stable monitoring planes, but the result would be limited to the accuracy of the relevant auxiliary data. If more accurate relevant auxiliary data could be obtain, e.g. road information from 1/1000 topographic maps, the result should be improved.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This study is supported by National Science Council (project number: NSC 97-2625-M-004-001-), and Water Resource Agency, Dept of Economics, Taiwan.

6. REFERENCES

- Abshire, J. B., J. F. McGarry, L. K. Pacini, J. B. Blair, and G. C. Elman, 1994. Laser Altimetry Simulator version 3.0: User's Guide, NASA Technical Memorandum 104588, pp. 6-34.
- Crombaghs, M. J. E., Brügelmann, R. and de Min, E. J., 2000. On the Adjustment of Overlapping Strips of Laseraltimeter Height Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, Part B3, pp. 230-237.
- Hsu, H. L., 2007. A Study on Changes of Soil Basic Settlements in the Yunlin Area (in Chinese) . Water Resource Agency, Dept of Economics, Taiwan, pp. 8-1.
- Hwang, C., W. C. Hong, C. B. Chang, and Y. F. Lu, 2008. Vertical displacements over Yunlin and Choshui River Alluvial Fan from leveling, GPS, multi-leveling well and DInSAR (in Chinese). In: *Proceedings of the 27th Survey Symposium*, Tainan, pp. 1493-1513.
- Lee, C. C., and S. H. Chio, 2008. The Study on land subsidence monitoring with airborne

LIDAR technology (in Chinese). In: Proceedings of the 27th Survey Symposium, Tainan, pp. 89-98.

Wang, H. Z., 2007. Full Waveform Analysis for Refining Positioning Accuracy of Airborne LIDAR Systems (in Chinese). A thesis for a Master's degree, Department of Civil Engineering, College of Engineering, National Taiwan University, Taipei, pp. 40-43.

以空載光達點雲及輔助資料監測地層下陷

Land subsidence monitoring using airborne LiDAR point clouds and relevant auxiliary data

謝幸宜¹ 李景中² 邱式鴻³

Hsing-Yi Hsieh Chin-Chung Lee Shih-Hong Chio

摘要

以精密水準測量監測地層下陷雖然精確，但耗費人力且難以獲得全面性的資料。空載光達技術可於短時間內獲取高密度、高精度的地表點雲資料，然點雲資料中可能包含不穩固的地物點，且點雲單點的高程精度可能無法符合地層下陷所需，因而需萃取較高精度且穩固、不易變動的地物面做為監測時的比較基準。本研究將2km×10km的監測試驗區分割為5m×5m的網格，再取網格內的點雲擬合平面，由擬合平面之幾何條件與1/5000地形圖的道路、房屋輔助資訊，萃取位於道路、房屋上的穩固監測面。最後計算不同時期的穩固監測面中心高程差作為下陷量，與地層下陷實測資料進行比較，作為將來應用空載光達點雲進行地層下陷監測之應用參考。

關鍵詞：光達，點雲，地層下陷，監測

Abstract

This study will use airborne LiDAR technique to acquire dense and accurate point clouds on land surface for land subsidence monitoring. However, the accuracy of single point in point clouds may be unsuitable for land subsidence monitoring, and the point clouds located on unstable surface of terrain objects should be removed. To deal with these problems, the test area with 2 km by 10 km will be divided into 5m by 5m sub-grids. Then the point clouds in each grid are used to fit plane by least squares principle. To acquire stable monitoring planes, the geometric constraints of the fitting planes and two kinds of relevant auxiliary, the road information and building information in the topographic maps with 1/5,000 scale, are employed. Next the centric elevation of the plane in each grid will be calculated based on fitting parameters. Finally, the height difference of each stable monitoring planes between two periods will be evaluated and analyzed with the collected ground truth data.

Keyword: Surveying, LiDAR, Point Clouds, Land subsidence, Monitoring

¹ 國立政治大學 研究生

² 國立政治大學 碩專班研究生

³ 國立政治大學 副教授

一、前言

臺灣西南沿海地區多為沖積平原，於經濟開發過程中，因抽取大量地下水，加上地質條件特性的影響，致使地層嚴重下陷，並影響民生經濟及工程建設的發展，多年來皆為防災、施政的重要課題之一。近年，高速鐵路等重大公共設施完成，且通過雲林地區地層下陷最嚴重的範圍，完整且精確的監測資料實為防災工作、工程維護及政策擬定的重要參考。

監測地層下陷的技術主要分為地表監測與地下監測兩大類，地表監測方法主要調查下陷的情況，而地下監測方法則可探查地層的下陷行為。地表監測中的精密水準測量，為目前地層下陷情況調查中精度較高且普遍使用的方法，但因人力耗費較高、施測所需時間較長且難以自動化，不易獲得連續性的資料，因而有其他地表監測技術的發展，如 GPS 衛星定位測量、InSAR 合成孔徑雷達干涉技術(柳志錫、譚凱英，2008；洪偉嘉、黃金維、張中白，2008)、LiDAR 空載光達技術(李景中、邱式鴻，2008)等。其中，InSAR、LiDAR 的精度分別可達公分、公寸等級(洪偉嘉、黃金維、張中白，2008；史天元、彭淼祥，2003)，獲取的測量資料較全面、資料的連續性高，所需耗費的人力較少，成為目前監測地層下陷的技術中最具自動化潛力者。然而目前常用的合成孔徑雷達影像來源，有加拿大 Radarsat-1 與法國 ERS-1/2 的衛星影像，此二衛星的回訪週期約為一個月(Radarsat-1 為 24 日；ERS-1/2 為 35 日)，相較之下，空載光達技術的機動性較高，故本研究中將探討如何應用空載光達技術所蒐集之點雲資料監測地層下陷。

然而空載光達獲取的點雲資料中，可能包含許多地物變遷的資訊，故本研究嘗試：(1)使用遙測分類的概念，由點雲之反射強度萃取穩固監測面(如：柏油道路與人工結構物之監測面)；(2)透過輔助資料，萃取位於道路與房屋上之穩固監測面，作為應用空載光達點雲資料於監測地層下陷之參考。

二、研究方法

空載光達施測所得的點雲資料為三維坐標資料，適用於三維地表資訊的描述，也可應用於數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)的產製。若以特定時間間隔對同一區域施測，則不同時期的地表產生變動、下陷時，可於點雲資料或由其產製的 DSM 中顯示出差異，並由此差異量分析、了解該區的地表變化趨勢。而目前空載光達所得之單點點雲精度，在高程方向約為 15 公分、平面方向約 50 公分(Guo and Yasuka, 1998; Lohr.U. *et al.*, 2004; Habib *et al.*, 2006)，但民國 86 至 97 年間，台灣各地層下陷區之最大年下陷速率與點雲精度相近，直接使用點雲資訊進行監測並不適當。

然而，空載光達之高程精度與掃描時的飛航高度、掃描角度及掃描的點密度有關，可於飛航掃描時適當規劃，如：降低飛航高度、縮小掃描角度...等，提高點雲之高程精度(經濟部水利署，2007b)。以本研究中使用之 Optech ALTM3070 掃描儀為例，當航高為 1200m 時，其高程精度在一倍標準差時為 15cm；航高為 3000m 時，高程精度在一倍標準差時為 35cm(廖永淦，2005)。本研究中所使用的點雲資料，其兩年度之飛航掃描參數均較一般掃描規格提高，如表 1 所示。

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

項目	2007.2.4	2008.3.16	一般掃瞄規格
航線數	83	13	視測區情況而定
交叉航線數	6	3	視測區情況而定
航高 (m)	600	600	800~1200
航速 (km / hr)	166.7	154	203
掃瞄角度 (deg)	± 15	± 15	± 18
雷射脈衝率 (KHz)	50	33	70
掃瞄鏡頻率 (Hz)	43	33	配合其他參數調整
掃瞄帶寬 (m)	322	322	520 ~ 780
重疊帶寬30% (m)	96	96	156 ~ 234
地面GPS測站	PA01(年平均高程差:-9.4cm) PA02(年平均高程差:-8.8cm)		二測站
基站與航線範圍 (km)	< 20	< 20	< 20

此外，若能於較平坦且較大範圍內獲得較多點雲，其平均高程可減少光達雷射雜訊的誤差 (Latypov, 2002)，即以多個光達點取代單個光達點時可忽略隨機誤差的影響：假設雷射雜訊之誤差為 12cm，而平坦面內之點雲數量為 100 點，則平均高程差異的精度為 $12 \times \sqrt{2} / \sqrt{100} = 1.7\text{cm}$ (Crombaghs and Brugelmann, 2000)。然而，不同時期的空載光達點雲難以落在相同位置上，難以比較同一位置上的高程變化；此外，不同時期的點雲數量可能不完全一致，且點雲資料可能相當龐大、難以計算，故本研究中先以 5m×5m 的規則網格將點雲分群，分別將分群後的多個光達點雲擬合成平面，並以擬合平面之中心高程作為高程差異之比較基準。

使用空載光達施測時，不同時期的點雲資料中可能包含地物變遷的資訊，但監測時需以位於穩固地物上的 5m×5m 網格面作為監測面來觀察其不同時期的變化，因此研究中分別以點雲之反射強度、1/5000 地形圖中的道路與房屋資料，萃取較平坦且不易變動的網格監測面作為監測時的參考。

三、研究資料說明及實驗流程

本研究之實驗區位於雲林縣，範圍約 2km×10km (如圖 1 白色矩形框所示)，包含近十年來雲林地區下陷速率及累積下陷量最大的褒忠鄉、土庫鎮及元長鄉一帶，有高速鐵路位於東側且由東北往西南方穿越 (工業技術研究院, 2008)。實驗區之 TWD97 左下角坐標約為(2618900m, 178800m)，右上角坐標約為(2620900m, 188800m)。該區之航空正射影像與空載光達掃描的範圍則如圖 2 所示。由航照影像中可見：實驗區主要為農業耕作區，雖然此區之遮蔽物少、地勢平坦，利於空載光達的作業，但農耕區內的耕作、變動，可能將不利於穩固監測面的選定。

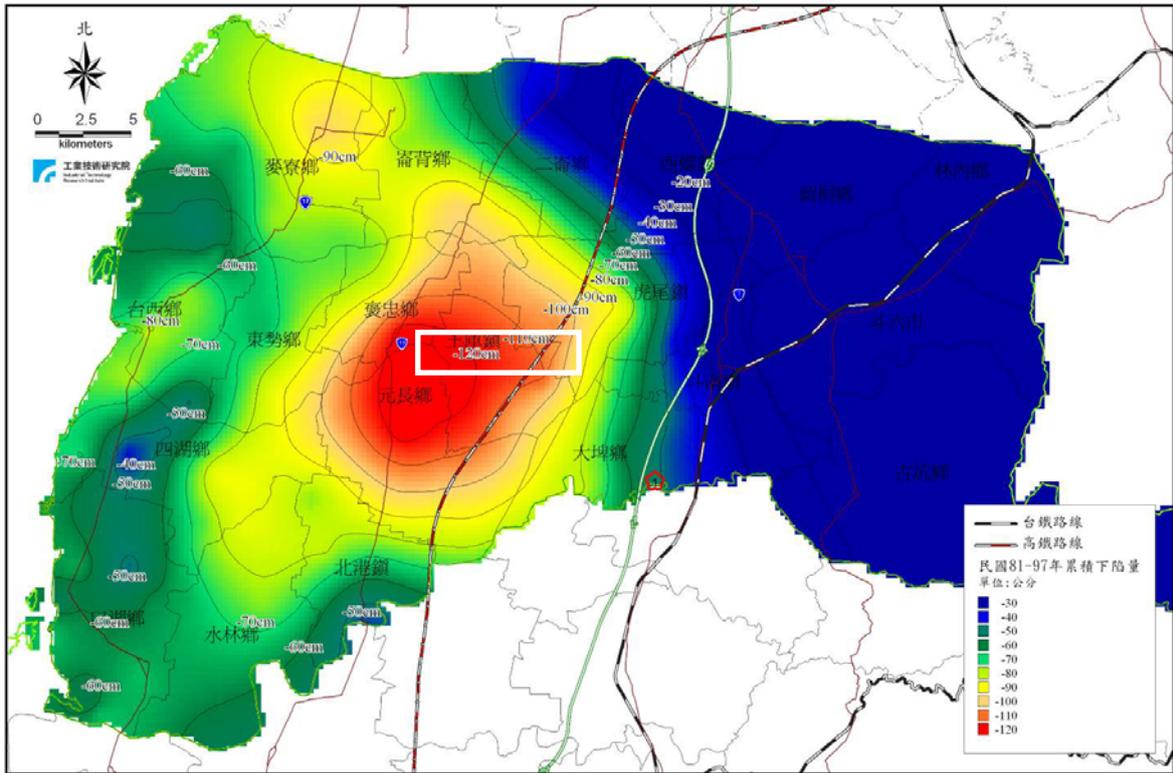


圖 1、雲林地區 81 年至 97 年累積下陷量圖



圖 2、測區之航空正射影像及空載光達掃描範圍（黃色矩形框）

載光達的作業，但農耕區內的耕作、變動，可能將不利於穩固監測面的選定。實驗空載空達點雲資料來源有二：(1)經濟部水利署於 96 年（2007 年）「雲林地區地層下陷地區地形變遷調查研究」之部份數據；(2)國科會「多時序三維空間資訊於地層下陷監測及分析」總計畫中之子計畫二「以空載光達技術進行地層下陷監測之研究」第一年（2008 年）的空載光達測量成果。以空載光達點雲資料及輔助資料分析地層下陷之實驗流程則如圖 3 所示。其中，配合 2007、2008 年空載光達掃瞄具 4.6、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（李景中、邱式鴻，2008）。

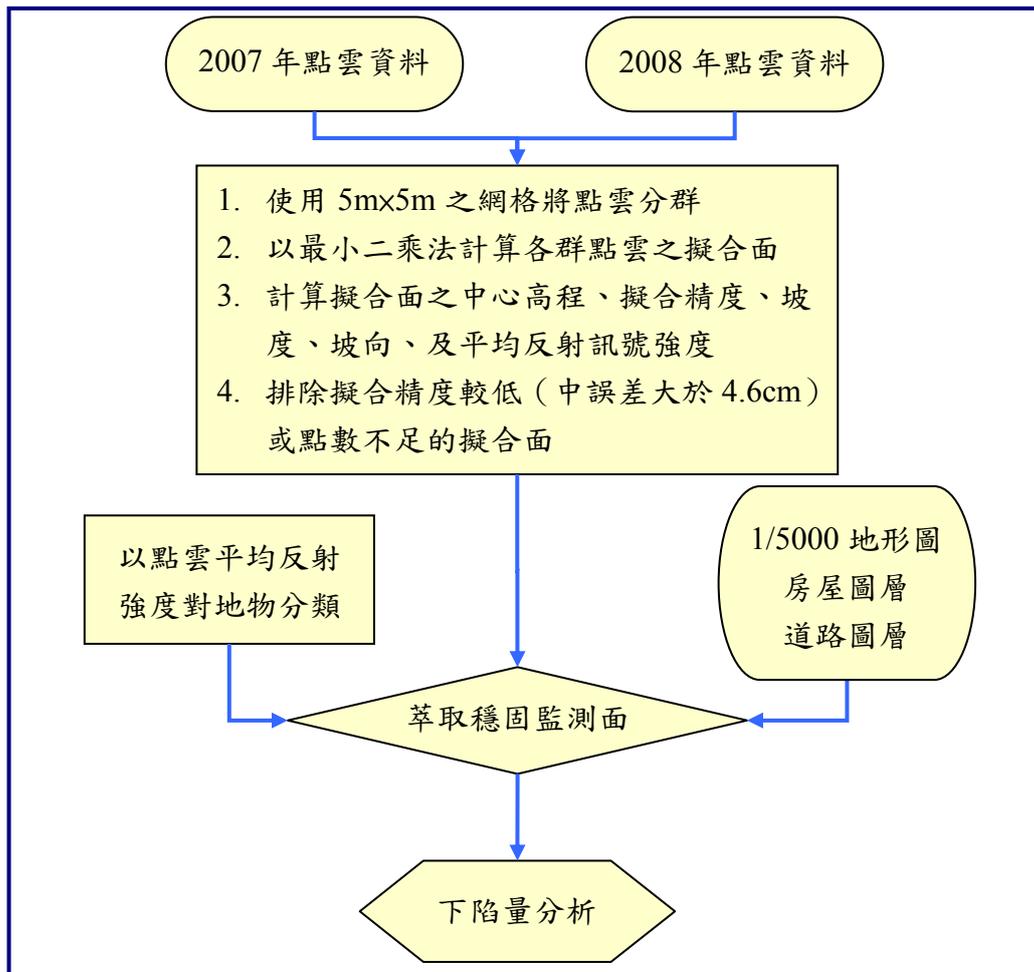


圖 3、以點雲資料及輔助資料分析地層下陷量之實驗流程圖

四、實驗成果與分析

4.1 實驗成果

本研究中之穩固監測面係以道路、人工建築物為標的，將位於其上 5m×5m 的規則網格內之點雲擬合成平面，以擬合平面之特性作為比較基礎。因空載光達測量之平面精度較高程精度差，若監測面坡度較大，平面誤差將影響高程大小。目前空載光達之高程精度達 15cm 時，平面精度約為 50cm，配合兩年空載光達掃描之內部精度：4.6cm、3.0cm，將平面坡度限制在 5°以內時，可使點雲因平面誤差而造成的高程誤差維持在 4.6cm 內（ $50\text{cm} \times \tan 5^\circ \approx 4.6\text{m}$ ）。然兩期資料符合平面精度 4.6cm 的平面高程差，含有少數大於絕對值 50cm 之值，可能為填土區或開挖區處，因此以 95% 的信賴區間排除異常數據之干擾，以 2.5%、97.5% 對應之 -32.0cm、5.0cm 為高程差過濾範圍。

因此當擬合平面之精度達 4.6cm 時，所萃取之穩固監測面應同時滿足：(1) 擬合面之坡度平緩；(2) 前後期資料之高程差異不宜過大；(3) 前後期資料之坡度變化不宜過大，因而設定下列門檻值做為過濾之參考：(1) 擬合面之坡度小於 5°；(2) 前後期擬合平面之坡度、坡向變化在 20% 內；(3) 兩期平面之夾角小於 2°。以下萃取方法中，皆以上述條件所獲取之穩固監測面，共計 3,869 個候選網格監測面為測試。

4.1.1 以反射強度萃取穩固監測面

由遙測的觀點而言，不同地物於不同波段的反射率並不完全相同，因而可透過該地物之光譜反射曲線 (spectral reflection curve) 作為分辨地物之依據。空載光達之雷射光源，雖不同於太陽入射光，但有研究認為：LiDAR 實際的反射強度和物質理論上的反射係數並不一致，但仍有相對大小的反射強度可供區別 (Song *et al.*, 2002)，也有研究提出：建物與樹木的反射強度值有明顯的差異 (Matikainen *et al.*, 2003)。因本研究中以網格內之擬合平面中心點 (以下簡稱網格中心) 作為比較基準，故以反射強度萃取道路、建物等穩固監測面時，反射強度值也以擬合平面範圍內之點雲平均反射強度值為代表。

將網格中心套繪至正射影像，比較網格中心於不同地物上之反射強度值，發現柏油道路之反射強度值約為 5~8，而屋頂、運動場、混凝土、人工草皮面等人工結構物 (以下總稱人工結構物) 之強度值約為 14~18。此外，前後期之穩固監測面，反射強度值之變化不應過大，因此設定平均反射強度差異之門檻值 20%，作為篩選的設定。

4.1.2 以 1/5000 地形圖之房屋/道路圖層萃取穩固監測面

空載光達發射的雷射訊號，會受到大氣層的吸收而衰減，且雷射訊號之反射強度值也與入射角、儀器與待測物體的距離、儀器條件等有關，且本研究中採用平均反射強度值對地物分類時，也可能導致以反射強度對地物分類時的誤差。為提高穩固監測面萃取的正確率，研究中亦以已知地形圖中的房屋、道路圖層，萃取穩固監測面。所萃取的網格中心，其分佈如圖 4 所示，黃色線框所標示者為掃描範圍。由圖中可得到下列觀察：(1)以房屋圖層萃取後所得的網格中心 (紅色) 並不多；(2)以道路圖層萃取後所得的網格中心 (藍色)，與圖中之道路位置大致相同，但在測區中央處的道路上，幾乎無法取得穩固監測面，主要是受到該區的擬合平面精度較差所影響。將房屋圖層與正射影像、由房屋圖層所萃取的網格中心 (紅色) 套疊後可發現：以 5m×5m 的網格大小擬合成平面時，對測區中多數房屋而言，此網格範圍稍嫌過大，不易取得符合。而將道路圖層與正射影像套疊後，可發現道路圖層與正射影像之道路位置略有差異。



圖 4、以 1/5000 地形圖輔助萃取位於之房屋 (紅色)、道路 (藍色) 上之穩固監測面

4.2 成果分析

上述不同方式萃取穩固監測面之成果，如表 3 所示，並由萃取之網格中心計算平均高程差 (下陷量)。由 4.1 節中的門檻值：(1)擬合面精度優於 4.6cm；(2)擬合面之坡度小於 5°；(3)前後期資料之網格中心高程差異在 -32~5cm 以內；(4)前後期擬合平面之坡度、坡向變化在 20% 以內；(5)前後期擬合平面之夾角在 2° 以內。其中，以 1/5000 地形

圖萃取時，是假設地形圖上的房屋、道路位置正確，因此不再由人工辨識是否屬於穩固監測面。

表 3、以不同方法萃取之穩固監測面

項目 \ 萃取方法	設定平均反射強度門檻值				1/5000 地形圖	
	無	5~8 (柏油道路)	14~18 (人工結構物)	5~8 與 14~18	道路	房屋
平均反射強度差異	20%以內				無約制	
萃取之監測面數量 (個)	1645	552	120	672	647	58
經人工辨識, 確認為穩固 監測面之數量 (個)	1036	427	107	534	--	--
正確率 (確認數/萃取數)	63%	77%	89%	80%	--	--
確認為穩固監測面之平均 高程差 (cm/13.3 個月)	-15.0	-10.9	-19.6	-12.6	-12.5	-19.1
年平均高程差 (cm/年)	-13.5	-9.8	-17.7	-11.4	-11.3	-17.2

由上述步驟所得的年平均高程差 (沉陷量)，相較於 2008 年經濟部水利署相同地區內水準點之平均沉陷量：8.6cm、最大沉陷量：9.3cm，皆呈現較大的沉陷量。其中，採用平均反射強度門檻值 14~18 萃取人工結構物所得的網格中心，或以 1/5000 地形圖之房屋圖層所萃取的網格中心，其沉陷量皆超過 17cm；而採用以反射強度門檻值 5~8 萃取柏油道路所得的網格中心，或以 1/5000 地形圖之道路圖層萃取之網格中心，沉陷量則分別為-9.8cm、-11.3cm。可發現萃取之人工結構物與房屋網格中心，其下沉量明顯較大，可能存有系統性的誤差。

根據 Abshire *et al.* (1994) 之研究顯示：一般光達常見的雷射測距回波感應器偵測時間的方法，包括 50% Rise time point、Peak、Center of Area、Mean、Mid point、Threshold 等方法 (詳圖 5)，而各個方法的優劣取決於地形複雜度與反射強度的變化而定 (王滙智, 2007)。其中，反射強度可能影響回波感應器偵測時間之長短，當反射強度較強時，可能導致偵測器紀錄的時間間隔稍短，而使量測之距離縮短。

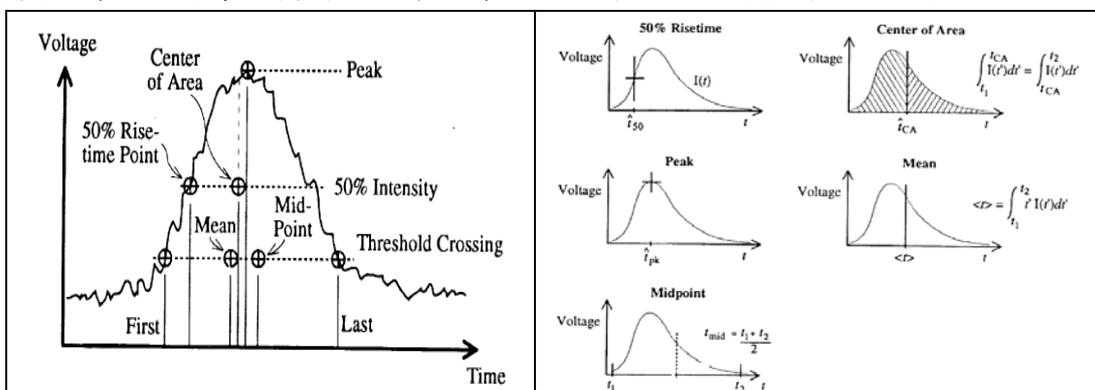


圖 5、光達回波感應器偵測時間方法示意圖 (Abshire *et al.*, 1994)

為了觀察網格中心之平均反射強度是否將影響兩期資料之高程差，圖 6、圖 7 中

比較反射強度與高程差。圖中的 x 軸代表網格中心編號，y 軸則代表下陷量（高程差，單位為 cm）或反射強度值（無單位）。dz 表示兩年資料於相同位置之網格中心高程差，單位為 cm；96_i 表示第一年之網格平均反射強度值；97_i 表示第二年之網格平均反射強度值；di_9697 則為第二年減第一年的網格反射強度差值。由圖 6、圖 7 之 di_9697，可發現多數的網格反射強度差值落在 0~-10 之間，而以房屋輔助萃取之網格中心高程差約為-10~-30cm、道路輔助萃取之網格中心高程差約為 0~-20cm。同時，兩圖中的 96_i 之反射強度值明顯高於 97_i 之值，推測可能由於第一年的儀器條件造成反射強度值較大，所得之高程較高，但第二年之反射強度值較低，所得高程較低，而導致高程差偏大。

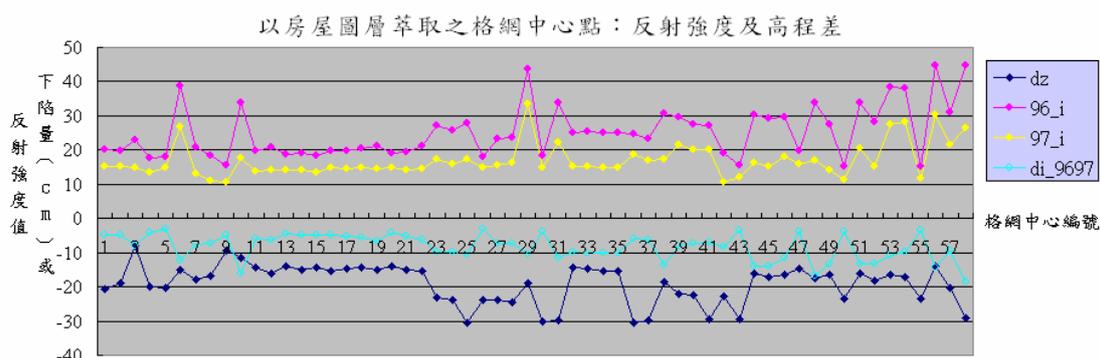


圖 6、以 1/5000 地形圖之房屋圖層萃取之網格中心反射強度及高程差

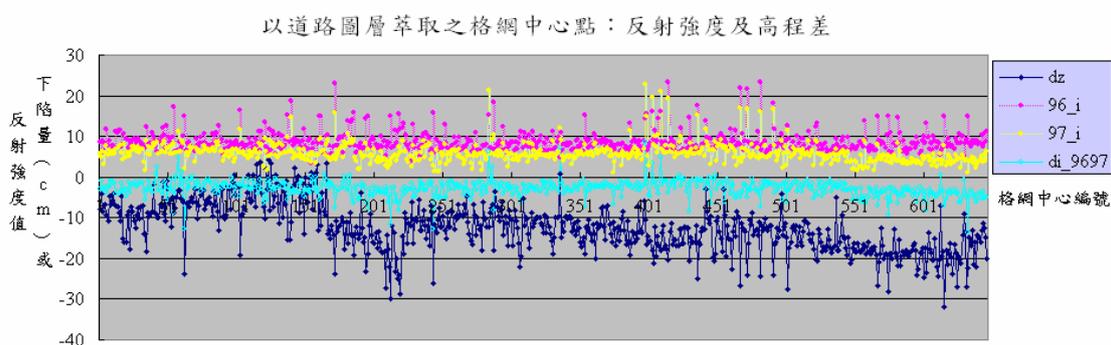


圖 7、以 1/5000 地形圖之道路圖層萃取之網格中心反射強度及高程差

五、結論與建議

(一) 由點雲擬合之平面，在適當的約制條件下，以平均反射強度 5~8 或 1/5000 地形圖的道路圖層萃取之網格中心平均高程變化量，與採用精密水準測量之成果相近，但以平均反射強度 14~18 或 1/5000 地形圖的房屋圖層萃取之網格中心平均高程變化量所得之下陷量相較於精密水準測量成果的差異較大。由此結果可知：反射強度值較低的穩固地物，如柏油道路，較適合做為穩固監測面的參考，而人工結構物、房屋等的反射強度較高，則可能因儀器接收雷射訊號的機制而產生系統性偏差。

(二) 本研究中使用 5m×5m 之網格，雖可提高計算效率，且網格範圍內的點雲數量較多，擬合面較具代表性，但 5×5m 大小的網格面或許不是為最佳的監測面大小，未來可嘗試使用不同大小的網格面，比較不同型態的監測區域適用的網格大小。

(三) 目前使用 1/5000 地形圖資，對於輔助穩固監測面的萃取，其精度仍然有限，若能提升地形圖資之精確度，如：使用 1/1000 的地形圖資，將更能精確萃取監測面 將可提升空載光達自動化監測地層下陷的能力。

(四) 使用空載光達資料的反射強度對地物分類時，雖然需要人為判斷穩固地物的反射強度值，並於萃取後加以人工判釋、排除錯誤，且雷射光可能受到大氣條件、距離、儀器接收訊號的機制等影響，但萃取的成功率可達 80% 左右，且可避免地形圖資不精確之困擾。由本實驗中可知此萃取方式與水準測量之成果相近，若能對空載光達之反射強度特性有更多研究，應可提高自動化監測之可行性。

(五) 本研究中尚未探討除了儀器之系統因素外，人工結構物（柏油路除外）、房屋區沉陷量明顯大於道路區沉陷量、精密水準測量沉陷量的其他可能原因。雖測區內地層下陷之成因主要為地下水超抽，但抽水井的位置、地下水的分布情形、地質條件、土壤的壓密特性、結構物載重、甚至施工紀錄等，或許也可能導致人工結構物（柏油路除外）、房屋區與道路區產生沉陷量的差異，而有待進一步探討。

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 97-2625-M-004 -001 -)經費支援。

參考文獻

- 王滙智，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。
- 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 頁。
- 李景中、邱式鴻，2008，應用空載光達測量技術於地層下陷監測之研究，第二十七屆測量及空間資訊研討會：台南，2008 年 9 月 4 日～5 日，69 頁。
- 洪偉嘉、黃金維、張中白，2008，應用水準測量、GPS、地層下陷監測井與 DInSAR 測量技術監測雲林地區地層下陷，第 30 屆海洋工程研討會暨國科會海工學門 96 年度研究計畫成果發表會：新竹，2008 年 11 月 13 日～14 日，專 71-80。
- 柳志錫、譚凱英，2008，地層下陷之監測方法。
<http://www.subsidence.org.tw/theorem.htm>，取用日期：2009 年 5 月 7 日。
- 財團法人工業技術研究院編著，2008，台北盆地、彰化與雲林地區地層下陷水準檢測及其相關分析計畫，臺北市，經濟部水利署。
- 經濟部水利署，2007b，雲林地區地層下陷地區地形變遷調查研究，8-1 頁。
- 廖永淦，2005，應用適應性卡曼濾波器演算法偵測空載光達點雲資料中隱含於地表覆蓋面上的異常點，國立成功大學土木工程學系，碩士論文：台南。
- 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.
- Crombaghs, M.J.E., Brugelmann, 2000, On the adjustment of overlapping strips of.

- laseraltimeter height data, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B3, 230-237
- Guo Tao, Yoshifumi Yasuoka., 1998, Combining high-resolution satellite imagery and airborne laser scanning data for generating bareland DEM in urban areas[A], ISPRS, Vol. 32, Part 4 "GIS-Between Visions and Applications", Stuttgart
- 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.
- Latypov D., 2002, Estimating relative lidar accuracy information from overlapping flight lines, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 56 (2002) (4):236-245.
- Lohr, U., A. Hellmeier, L. Barruncho, 2004, Precise LiDAR data - an efficient way to build up virtual 3D city models, International Workshop on Vision Techniques Applied to the Rehabilitation of City Centres organized by CIPA, Portugal: Lisbon
- Matikainen, L., Hyyppa, J., and Hyyppa, 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.
- 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.

附件二 出國成果報告書

名稱：	參加第 30 屆亞洲航遙測研討會(The 30 th Asian Conference on Remote Sensing) 與發表論文		
計畫編號 ⁴	NSC98-2625-M-004-001-	執行單位 ⁵	政治大學地政學系
出國人員	謝幸宜	職稱	兼任助理
出國地點 ⁶	中國 北京 (ACRS 2009)	出國日期	98 年 10 月 17 日至 98 年 10 月 24 日， 共 8 日
報告日期	98 年 11 月 1 日		
報告內容摘要：			
<p>出國人員為第一次參與國際性研討會，因此，報告內容主要在簡述目前幾個亞洲國家的遙測技術發展狀況，並以個人觀點比較國內外研討會的籌備狀況、提出建議。</p>			
<p>一、目的：</p>			
<ol style="list-style-type: none"> 1. 發表論文：Land Subsidence Monitoring Using Airborne LiDAR Data and Relevant Auxiliary Data。此篇論文被安排在 Student Session 中口頭報告。 2. 觀摩其他國家在航遙測領域中的發展，了解亞洲地區在此領域中的發展趨勢。 3. 與其他學校的老師、學生切磋學習。 			
<p>預期成果</p>			
<ol style="list-style-type: none"> 1. 提升我國及本校的能見度 2. 與各國學生、學者、廠商互動，蒐集航遙測領域在國際性的資訊。 			
<p>二、過程</p>			
<p>此次會議在北京舉行，主要會議進行的日期為 10 月 19-23 日，而 10 月 18 號安排了一整天的 Student Session，晚上並有 Student Party，提供了學生一個互相切磋、</p>			

認識彼此的機會。

會議過程中，看到許多亞洲國家在航遙測領域上的進展，整體而言，亞洲區的航遙測技術，是以日本、台灣、大陸（韓國方面幾乎沒有參與此會議）為領先。日本方面，以防災領域上的技術發展為主；台灣則著重在數值資料的處理、自動化程序的研究；大陸學者及學生的人數較多，且與太空科技結合，在技術和應用領域上都有所發展；其他國家，則多以應用遙測技術為主。

另外，在與大陸學生交流的過程中，得知武漢大學的測繪科，每年大學部畢業學生就有 1000 人左右，在此領域中佔有相當重要的影響力。

參與會議的過程中，同時拜訪了北京的一些名勝古蹟，也體會到北京在奧運之後大幅進步的水準。

三、心得

1. 在研討會上，發現在亞洲地區的航遙測領域中，近年來應有幾個受到較多關注的主題，而這些主題，也多與國內研討會中所看到的趨勢接近：(1)全球氣候變遷的監測；(2)林業、農業、海岸與海洋、土地利用等的調查及監測；(3)應用 SAR 影像監測地表變化、地表覆蓋的研究；(4)遙測影像、GIS 於防災工程中的應用；(5)應用影像、LiDAR 資料或 GIS 建立三維數值模型的技術；(6)整合不同資料來源的技術（不同衛星的影像融合、結合 LiDAR 與影像的資料、整合既有的三維模型及影像資料、以 GIS 整合不同來源的既有資料...等）；(7)網路 GIS (Web GIS)。
2. 在會議中可看到幾個較新發展的技術：PSInSAR (Persistent Scatterers InSAR，永久散射點)、無人載具(UAV)獲取的影像應用。而在國內研討會中較少見的主題則有：應用 GIS 輔助人類環境衛生情況的改善、海洋環境或汙染的監測等，相較於四周環海的台灣而言，在航遙測領域中對海洋環境的研究較缺乏，應有值得加強或探討的空間。
3. 而此次會議中，監測地層下陷的相關討論相對較少，僅有兩篇使用 PSInSAR 的口頭發表文章、參加此次會議所發表的文章(Land Subsidence Monitoring Using Airborne LiDAR Data and Relevant Auxiliary Data)、以及一篇以多時期航照影像監測地層下陷的海報發表文章，且後兩篇由我國發表。參考國內測量及空間資訊研討會的文章，其實有許多探討地層下陷、監測地層下陷的文章。或許是其他亞洲國家較少發生地層下陷的問題，因此文章較為缺乏。地層下陷發生的機制，牽涉到相當多領域的專門知識：地質、水利、防災、土地相關法規的規範...等，僅由航遙測的觀點切入，實有不足，且在亞洲地區可供參考的經驗似乎不多，國內應整合更多領域的專家學者一起探討，共同根治地層下陷的問題才好。
4. 此次國內參加研討會的大專院校中，以中央大學、成功大學、政治大學的學生為主要的學生參與主體，其他學校的學生人數較少。在 Student Session 中，台灣學生與大陸學生的口語報告能力較佳，其他國家學生的英文口音較重而難以理解，不過，日本學生相當積極、台風穩健，且投影片中有許多創意、圖片說

明，補足了口說方面的不足，相當值得學習。

5. 在用餐、討論的過程中，中國與台灣學生的發言踴躍程度比日本學生稍差。遇有講者缺席的情況，日本學生多會主動要求上台報告的機會，但中國與台灣學生則多會私下與熟識的朋友討論，但討論的內容，其實比起會議進行中的討論，或許還更深入。也許是民族性不同，但也很有可能是在我們的教育過程中，並不鼓勵學生發言、或不重視學生發言的機會，而導致學生雖然了解了七、八成，卻只能表達出二、三成的窘境。
6. 此次會議中，台灣學生張桓雖然行動不便，但其表現特別優異、連連得獎，且積極參與各項活動，值得學習。

四、建議：

1. 在校內可多鼓勵學生上台報告、以英文報告，在面對國際性場合時，能更從容地表達自己的思想。

計畫編號 NSC98-2625-M-004-001- 出國成果報告書

名稱：	參加第 30 屆亞洲航遙測研討會(The 30 th Asian Conference on Remote Sensing) 與發表論文		
計畫編號	NSC98-2625-M-004-001-	執行單位	政治大學地政學系
出國人員	謝幸宜	職稱	兼任助理
出國地點 ¹	中國 北京	出國日期	98 年 10 月 17 日~24 日，共 8 日
報告日期	98 年 11 月 1 日		
報告內容摘要：			
<p>出國人員為第一次參與國際性研討會，因此，報告內容主要在簡述目前幾個亞洲國家的遙測技術發展狀況，並以個人觀點比較國內外研討會的籌備狀況、提出建議。</p>			
<p>一、目的：</p>			
<ol style="list-style-type: none"> 1. 發表論文：Land Subsidence Monitoring Using Airborne LiDAR Data and Relevant Auxiliary Data。此篇論文被安排在 Student Session 中口頭報告。 2. 觀摩其他國家在航遙測領域中的發展，了解亞洲地區在此領域中的發展趨勢。 3. 與其他學校的老師、學生切磋學習。 			
<p>預期成果</p>			
<ol style="list-style-type: none"> 1. 提升我國及本校的能見度 2. 與各國學生、學者、廠商互動，蒐集航遙測領域在國際性的資訊。 			
<p>二、過程</p>			
<p>此次會議在北京舉行，主要會議進行的日期為 10 月 19-23 日，而 10 月 18 號安排了一整天的 Student Session，晚上並有 Student Party，提供了學生一個互相切磋、認識彼此的機會。</p>			
<p>會議過程中，看到許多亞洲國家在航遙測領域上的進展，整體而言，亞洲區的航遙測技術，是以日本、台灣、大陸（韓國方面幾乎沒有參與此會議）為領先。日本方面，以防災領域上的技術發展為主；台灣則著重在數值資料的處理、自動化程</p>			

序的研究；大陸學者及學生的人數較多，且與太空科技結合，在技術和應用領域上都有所發展；其他國家，則多以應用遙測技術為主。

另外，在與大陸學生交流的過程中，得知武漢大學的測繪科，每年大學部畢業學生就有 1000 人左右，在此領域中佔有相當重要的影響力。

參與會議的過程中，同時拜訪了北京的一些名勝古蹟，也體會到北京在奧運之後大幅進步的水準。

三、心得

1. 在研討會上，發現在亞洲地區的航遙測領域中，近年來應有幾個受到較多關注的主題，而這些主題，也多與國內研討會中所看到的趨勢接近：(1)全球氣候變遷的監測；(2)林業、農業、海岸與海洋、土地利用等的調查及監測；(3)應用 SAR 影像監測地表變化、地表覆蓋的研究；(4)遙測影像、GIS 於防災工程中的應用；(5)應用影像、LiDAR 資料或 GIS 建立三維數值模型的技術；(6)整合不同資料來源的技術（不同衛星的影像融合、結合 LiDAR 與影像的資料、整合既有的三維模型及影像資料、以 GIS 整合不同來源的既有資料…等）；(7)網路 GIS (Web GIS)。
2. 在會議中可看到幾個較新發展的技術：PSInSAR (Persistent Scatterers InSAR, 永久散射點)、無人載具(UAV)獲取的影像應用。而在國內研討會中較少見的主題則有：應用 GIS 輔助人類環境衛生情況的改善、海洋環境或汙染的監測等，相較於四周環海的台灣而言，在航遙測領域中對海洋環境的研究較缺乏，應有值得加強或探討的空間。
3. 而此次會議中，監測地層下陷的相關討論相對較少，僅有兩篇使用 PSInSAR 的口頭發表文章、參加此次會議所發表的文章(Land Subsidence Monitoring Using Airborne LiDAR Data and Relevant Auxiliary Data)、以及一篇以多時期航照影像監測地層下陷的海報發表文章，且後兩篇由我國發表。參考國內測量及空間資訊研討會的文章，其實有許多探討地層下陷、監測地層下陷的文章。或許是其他亞洲國家較少發生地層下陷的問題，因此文章較為缺乏。地層下陷發生的機制，牽涉到相當多領域的專門知識：地質、水利、防災、土地相關法規的規範…等，僅由航遙測的觀點切入，實有不足，且在亞洲地區可供參考的經驗似乎不多，國內應整合更多領域的專家學者一起探討，共同根治地層下陷的問題才好。
4. 此次國內參加研討會的大專院校中，以中央大學、成功大學、政治大學的學生為主要的學生參與主體，其他學校的學生人數較少。在 Student Session 中，台灣學生與大陸學生的口語報告能力較佳，其他國家學生的英文口音較重而難以理解，不過，日本學生相當積極、台風穩健，且投影片中有許多創意、圖片說明，補足了口說方面的不足，相當值得學習。
5. 在用餐、討論的過程中，中國與台灣學生的發言踴躍程度比日本學生稍差。遇有講者缺席的情況，日本學生多會主動要求上台報告的機會，但中國與台灣學

生則多會私下與熟識的朋友討論，但討論的內容，其實比起會議進行中的討論，或許還更深入。也許是民族性不同，但也很有可能是在我們的教育過程中，並不鼓勵學生發言、或不重視學生發言的機會，而導致學生雖然了解了七、八成，卻只能表達出二、三成的窘境。

6. 此次會議中，台灣學生張桓雖然行動不便，但其表現特別優異、連連得獎，且積極參與各項活動，值得學習。

四、建議：

1. 在校內可多鼓勵學生上台報告、以英文報告，在面對國際性場合時，能更從容地表達自己的思想。

Land subsidence monitoring using airborne LiDAR data and relevant auxiliary data

Hsing-Yi Hsieh, Chin-Chung Lee, Shih-Hong Chio
National Chengchi University (Chinese Taipei)
Phone: +8862 2939 3091 #50621, Fax: +8862 2937 9611
Email: 97257024@nccu.edu.tw

KEY WORDS: LiDAR, Point Clouds, Land subsidence, Monitoring

ABSTRACT

Precise leveling has high accuracy for land subsidence monitoring, but it is time-consuming and only profile data can be captured. Airborne LiDAR (Light Detection And Ranging) acquires dense and accurate point clouds on land surface rapidly. This technique can offer the potential for comprehensive analysis of land subsidence. However, the point clouds could be located on unstable terrain objects, and the accuracy of single point in point clouds may not be suitable for the evaluation of land subsidence in regular flight scanning design. After specific flight scanning design, the extraction of point clouds on stable terrain objects, e.g. road surfaces or building rooftops, and accurate elevation determination on the representative location for land subsidence monitoring are necessary. In this study, the test area with 2 km by 10 km will be divided into 5m by 5m sub-grids and each centric elevation of the grid will be calculated by the fitting planar parameters, which is determined by least squares fitting according to the point clouds in each grid. Subsequently, three approaches for acquiring stable monitoring planes will be presented in this study: (1) to classify the point clouds on stable terrain objects by its intensity, (2) to extract the point clouds on road surfaces from the road information in the topographic maps with 1/5,000 scale, (3) to extract the point clouds on rooftops from the building information in the topographic maps with 1/5,000 scale. Finally, the land subsidence between two different periods of airborne LiDAR data from the approaches mentioned above will be evaluated and analyzed based on the collected ground truth.

1. INTRODUCTION

Land subsidence in Yunlin County, an important agricultural area in Taiwan, has caused threats to people's property and civil infrastructures. Therefore, comprehensive and accurate land subsidence monitoring is an important reference for disaster prevention. Currently monitoring approaches for land subsidence can be categorized into 2 classes: surface monitoring and subsurface monitoring. The former contains precise leveling, global positioning system (GPS), differential interferometry SAR (DInSAR), and airborne light detection and ranging (LiDAR), and the latter contains multi level monitoring well.

Among the approaches, DInSAR and airborne LiDAR have the most potential for acquiring

comprehensive data for land subsidence automatically. Especially the spatial resolution and the mobility of airborne LiDAR approach are better than DInSAR approach (Table 1), so airborne LiDAR approach will be used for land subsidence monitoring in this study.

Table 1 Comparison Table for Various Monitoring approaches (Adapted from Hwang et al., 2008)

Approach	Precise Leveling	GPS	DInSAR	LiDAR	Monitoring Well
Spatial Resolution	1.5~2 km	10~15 km	25 m	1~4 points/m ²	5~10 km
Survey Frequency	1 year	1 day	35 days	Free	1 month
Vertical Accuracy	0.5~1 cm	0.5~1 cm	2 cm	≤ 15 cm (single point)	0~0.5 cm

2. DATA AND METHODS

In Table 1, the vertical accuracy of airborne LiDAR single point is not as good as other approaches. However, the vertical accuracy of airborne LiDAR single point is affected by flying altitude, aircraft speed, pulse rate, cross strips, and scan rate, etc. Appropriate flight planning and design can promote the vertical accuracy of airborne LiDAR single point to 5 cm (Hsu, 2007). The flight parameters for this study are listed in Table 2, and the test area with 2 km by 10 km locates in Yunlin County. According to the records from Taiwan Water Resource Agency, the average subsidence rate of this area is -8.6 cm/year and the maximum subsidence rate is -9.3 cm/year.

Table 2 Flight and Technical Parameters of Airborne LiDAR Scanning Data

	2007.2.4	2008.3.16	General cases
Total strips	83 (test site)	13 (test site)	Depending on the project requirements
Cross strips	6	3	Depending on the project requirements
Flying altitude (m)	600	600	800 ~ 1200
Aircraft speed (km / hr)	166.7	154	203
Scan angle (°)	± 15	± 15	± 18
Pulse rate (KHz)	50	33	70
Scanning rate (Hz)	43	33	Adjust to other parameters
Average ground swath (m)	322	322	520 ~ 780
30% strips overlap (m)	96	96	156 ~ 234
GPS base station	2 (Average subsidence rate: PA01: -9.4cm/year PA02: -8.8cm/year)		2
Distance between the strips and GPS base stations (km)	< 20	< 20	< 20
Internal accuracy	4.6 cm	3.0 cm	--

The laser footprints between two periods may not be on the same location, and this will cause

some problems in computing the height difference. In addition, according to Crombaghs and Brügelmann (2000), the height differences can be computed as mean differences for groups of minimal 100 points in a specific area to reduce the noise of individual point. The specific area should be flat and smooth, otherwise small planimetric errors might have a large impact on the mean difference. As a result, multiple points in an area are used to get a fitting plane and those fitting planes could supply bases for comparison between two-period data in this study. The followings will describe the approach used in this study.

The spatial resolutions of the point clouds in this study are about 4 points/m². And 5m by 5m sub-grids are used to divide the point clouds first. Second, the point clouds in each sub-grid are used to determine a fitting plane by least squares method. If the standard error of the fitting plane is over 4.6 cm, this plane would not be accepted as possible monitoring plane. Third, the centric elevations of each fitting planes will be used to compute the height difference, and the mean intensity value of the point clouds in a sub-grid is used to represent the intensity value of the fitting plane. Finally, three approaches were used to acquire stable monitoring planes: (1) classifying the point clouds on stable terrain objects by its intensity, (2) extracting the point clouds on road surfaces from the road information in the topographic maps with 1/5,000 scale, (3) extracting the point clouds on rooftops from the building information in the topographic maps with 1/5,000 scale. The study flowchart is illustrated as Fig. 1.

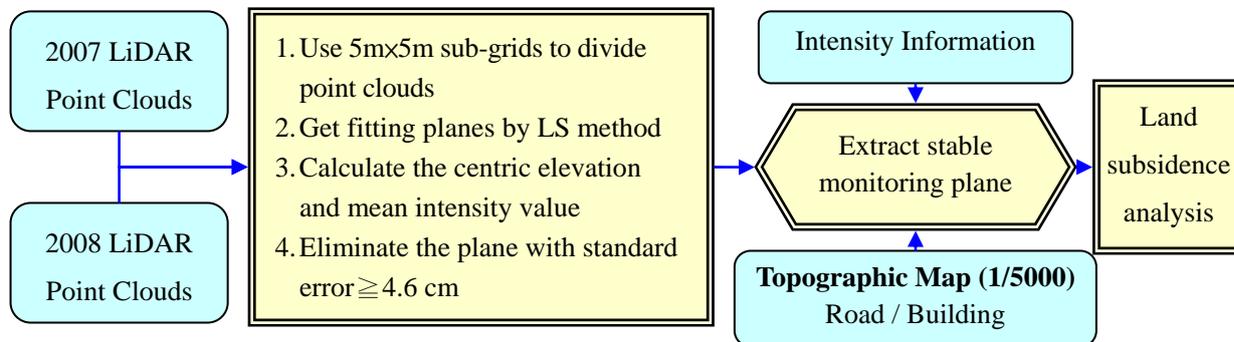


Figure 1 Study Flowchart

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

During the process of evaluating the height differences, 95% confidence interval is used to screen the unstable area out (Fig. 2). Besides, in order to get more reliable stable planes, some thresholds are chosen after trail and error: (1) the slope of a fitting plane should be less than 5°, (2) the change rate in slope of the fitting planes between two periods should be less than 20%, (3) the change rate in aspect of the fitting planes between two periods should be less than 20%, (4) the angle difference of the fitting planes between two periods should be less than 2°. At last, the mean intensity value of the fitting plane and the information in the topographic maps are used to extract the stable monitoring planes. The results are listed in Table 3 and displayed as Fig. 3.

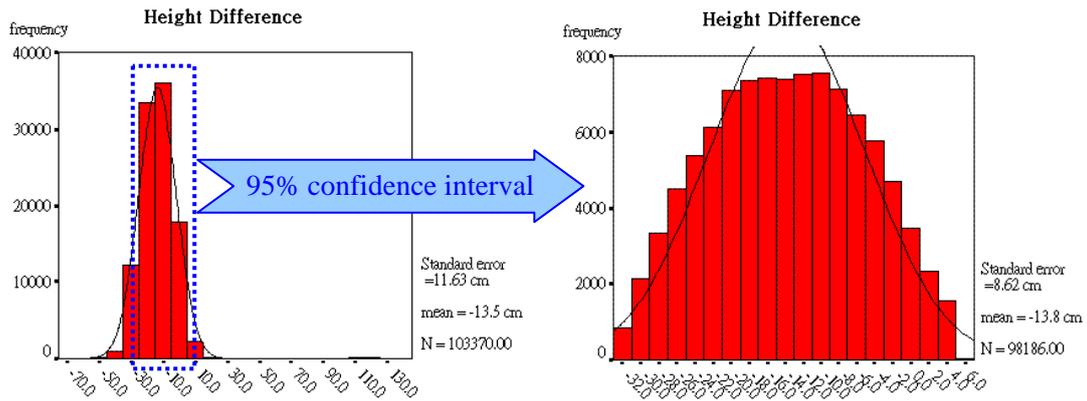


Figure 2 Distribution of the Height Difference

Table 3 Results of Extracting Stable Monitoring Planes by Different Auxiliary Information

Auxiliary Information	Average Intensity Value of the Fitting Plane				Topographic Maps with 1/5,000 Scale		None
	0-70 (all surface features)	5-8 (asphalt roads)	14-18 (man-made structures)	5-8 and 14-18	Road information	Building information	
Used Intensity Value/ Information	0-70 (all surface features)	5-8 (asphalt roads)	14-18 (man-made structures)	5-8 and 14-18	Road information	Building information	--
Specific Threshold	the change rate in intensity of the fitting planes between two periods should be less than 20%				none		none
Amount of Extracting Planes	1645	552	120	672	647	58	3869
Amount of Confirmation	1063	427	107	534	--	--	--
Correct Rate	63 %	77 %	89 %	80 %	--	--	--
Average Subsidence Rate	-13.5 cm/year	-9.8 cm/year	-17.7 cm/year	-11.4 cm/year	-11.3 cm/year	-17.2 cm/year	-12.9 cm/year



(a) Green Point: Extracted by Intensity Value 5-8; Red Point: Extracted by Intensity Value 14-18



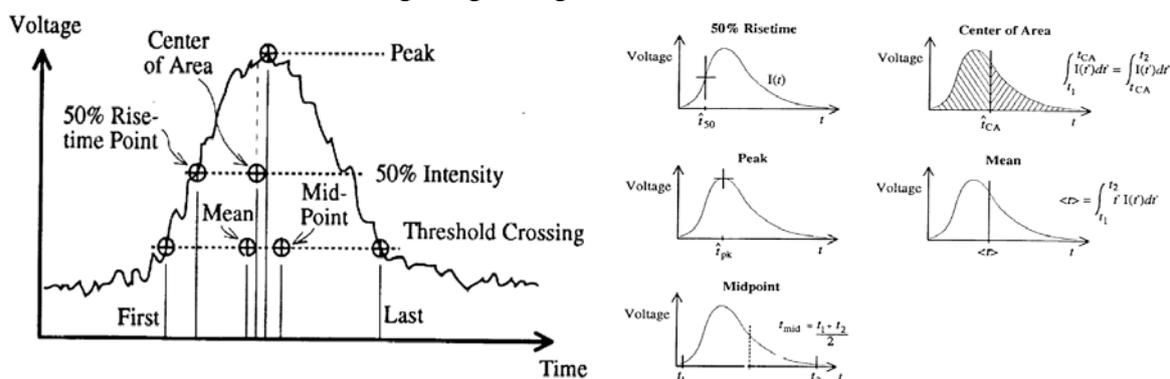
(b) Blue Point: Extracted by Road Information; Magenta Point: Extracted by Building Information

Figure 3 Extracting Results Overlapped on the Orthophotos

Before introducing the specific threshold of intensity value, this study deals with the attenuation of the laser intensity by a multiplication constant. And the correct rate in Table 3 is the ratio of the amount of extracting planes to the amount of confirmation. In the confirming processing, all planes extracted by the intensity value threshold are displayed on the orthophotos. And then, each plane is checked manually. When the information of the topographic maps is used to extract stable planes, the confirming process is cancelled. This is because the accuracy of the orthophotos may be close to or be worse than the accuracy of the topographic maps.

Comparing the results in Table 3 with the subsidence rates of the two GPS base stations (Table 2), and the records of the Water Resource Agency, the results of extracting the stable monitoring planes by the intensity of asphalt roads and by the road information of the topographic maps with 1/5000 scale are closed to the subsidence rates of the GPS base stations and the records. The land subsidence rates resulted from the intensity of man-made structures and the building information of topographic map are almost twice as much as these reference records. During the data processing, diverse noise is eliminated. As far as error source is concerned, the subsidence rates extracted by the intensity of man-made structures and by the building information of topographic maps might include some systematic errors.

The main principle of laser altimetry system is measuring the time delay of a laser pulse between the transmission and return. However, the waveform of the return pulse and the modes of the time estimation would affect the accuracy of time measuring. This could be stated in the Fig. 4 (Abshire et al., 1994). According to Wang (2007), if the time estimation mode adopts Mean or Mid Point method, different intensity may cause errors in elevation. On account of that the original intensity value of the man-made structures and the buildings are higher than the asphalt roads and the roads, the subsidence rates of the buildings might be greater than the roads.



(a) Digitized Waveform with Timing Estimators (b) Waveform Timing Estimators

Figure 4 Waveform and Timing Estimators

4. CONCLUSIONS

This paper applies the LiDAR altimetry data and the relevant auxiliary information to land

subsidence monitoring. Three approaches for acquiring stable monitoring planes are presented and discussed: (1) classifying the point clouds by its intensity, (2) extracting the point clouds on road surfaces by using the topographic maps with 1/5,000 scale, (3) extracting the point clouds on buildings by using the topographic maps with 1/5,000 scale.

From the results of the experiment, a flat and stable monitoring surface with lower intensity value, e.g. the asphalt road, can obtain reasonable subsidence rate and provide a more automatic method for land subsidence monitoring. Additionally, a specific surface feature with lower intensity value is a better land subsidence monitoring plane than the feature with higher intensity value, e.g. a man-made structure. There seems to have some systematical error in the result of extracting man-made structures, and the mechanism of LiDAR needs to be discussed more profoundly.

Using relevant auxiliary data, such as the road and building information in the topographic maps, can extract the stable monitoring planes, but the result would be limited to the accuracy of the relevant auxiliary data. If more accurate relevant auxiliary data could be obtain, e.g. road information from 1/1000 topographic maps, the result should be improved.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This study is supported by National Science Council (project number: NSC 97-2625-M-004-001-), and Water Resource Agency, Dept of Economics, Taiwan.

6. REFERENCES

- Abshire, J. B., J. F. McGarry, L. K. Pacini, J. B. Blair, and G. C. Elman, 1994. Laser Altimetry Simulator version 3.0: User's Guide, NASA Technical Memorandum 104588, pp. 6-34.
- Crombaghs, M. J. E., Brügelmann, R. and de Min, E. J., 2000. On the Adjustment of Overlapping Strips of Laseraltimeter Height Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, Part B3, pp. 230-237.
- Hsu, H. L., 2007. A Study on Changes of Soil Basic Settlements in the Yunlin Area (in Chinese) . Water Resource Agency, Dept of Economics, Taiwan, pp. 8-1.
- Hwang, C., W. C. Hong, C. B. Chang, and Y. F. Lu, 2008. Vertical displacements over Yunlin and Choshui River Alluvial Fan from leveling, GPS, multi-leveling well and DInSAR (in Chinese). In: *Proceedings of the 27th Survey Symposium*, Tainan, pp. 1493-1513.
- Lee, C. C., and S. H. Chio, 2008. The Study on land subsidence monitoring with airborne LIDAR technology (in Chinese). In: *Proceedings of the 27th Survey Symposium*, Tainan, pp. 89-98.
- Wang, H. Z., 2007. Full Waveform Analysis for Refining Positioning Accuracy of Airborne LIDAR Systems (in Chinese). A thesis for a Master's degree, Department of Civil Engineering, College of Engineering, National Taiwan University, Taipei, pp. 40-43.