

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

雷射掃描技術於隧道內空變位監測之應用

Utilizing LiDAR Technique in Monitoring Tunnel

Deformations

江怡萱

Yi-Hsuan Chiang

指導教授：韓仁毓 博士

Advisor: Dr. Jen-Yu Han

中華民國 103 年 2 月

Feb. 2014

國立臺灣大學（碩）博士學位論文
口試委員會審定書

雷射掃描技術於隧道內空變位監測之應用

Utilizing LiDAR Technique in Monitoring Tunnel
Deformations

本論文係江怡萱君（R99521113）在國立臺灣大學土木工程學系碩(博)士班完成之碩（博）士學位論文，於民國 102 年 9 月 27 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

韓仁毓

(指導教授)

黃燦輝

王泰典

黃仲偉

呂良正

韓仁毓

黃燦輝

王泰典

黃仲偉

呂良正

(簽名)

系主任

誌謝



時光荏苒，求學之路終於暫告一段落，在台大這三年半的時間裡受到了很多人的幫助，因此我才能順利取得學位，朝向下一個階段。其中居功厥偉亦是我最感激的當屬指導教授韓仁毓老師，猶記得第一次與老師見面就談了許多，令當時有些茫然的我有了一條明確的路。而在整個研究過程中，不論我提出什麼樣的問題，老師總是很有耐心的為我解惑，讓我獲益良多。除了研究上的指導，我也很感謝老師對我的諸多包容，不論我因為家庭因素或自身的夢想直接或間接造成研究進度的落後，老師都予以體諒及鼓勵。真的很感謝老師一直以來的教導及協助！

感謝趙鍵哲老師及徐百輝老師在 seminar 及課業上的諸多協助，令我更加瞭解測量的範疇有多廣泛。感謝口試委員黃燦輝老師、王泰典老師及黃仲偉老師給予許多精闢的見解和建議，讓我的研究成果及展現能更臻完美。謝謝我的 partner 怡潔在研究路上一起打拼及不時的鼓勵，謝謝怡岑、彥璋、耿帆、中豪及任軒在我課業有不懂或是程式又遇到 bug 的時候給了我很多的協助。謝謝學長姐們給予的指教及鼓勵，也謝謝學弟妹們在我有需要的時候伸出援手。

感謝我親愛的交大室友們和同學們，即便我是少數離開新竹的人，大家也總是不忘揪我一起聚餐聊天分享研究所的甘苦。謝謝采容和德惠，因為有妳們，我才能熬過很多困難的時候，每次聚會時一起懷念大學的回憶或是分享研究遇到的瓶頸和挫折，都能讓我再精神滿滿的迎接挑戰，謝謝你們總在我需要時陪著我。

感謝國中 316 的同學們，我們多年的友誼總給我一股支持的力量，雖然平常甚少見面，但我知道無論何時都有你們在。謝謝所有未能列出的親朋好友給予我的關心和支持。

最後，深深感謝我的父母和妹妹。謝謝你們總是給予我鼓勵和關懷，雖然在許多事上偶有爭吵，但我了解這是因為你們有多愛我們。謝謝貼心的妹妹總是陪著我分享喜怒哀樂，真的謝謝你們，我愛你們！

中文摘要



臺灣地形複雜多變，為便利交通聯絡，許多隧道應運而生。由於營運中的隧道安全直接影響使用者的人身安全，其監測及維護工作更顯重要，目前評估隧道安全穩定性的項目種類繁多，其中內空變位監測是重點項目之一。另一方面，雷射掃描技術(簡稱光達)因具有可快速且自動搜集三維空間資訊的優點，常被應用於工程領域之監測任務，惟光達蒐集之原始數據為隨機分佈的離散點雲，無法直接提供待測物的外顯幾何資訊，需要以資料後處理得到欲分析的資訊。本研究目的為建立一完整變形分析流程，以有效運用光達原始點雲的資料訊息，同時提高資料處理的效益，進而提供符合工程監測規範之隧道變位分析結果。研究中首先利用原始資料中的現地特徵，將多時期多測站光達資料整合至共同坐標基準，再建立隧道二維變形分析模型及隧道三維變形分析模型，進行全隧道變位訊號估計與品質評估。由數值模擬及現地實驗成果顯示，本研究方法具有高度的演算效率以及自動化潛能，並且能夠提供隧道完整而細膩的變位監測以及可靠度資訊，因此可作為現行隧道安全監測任務中一項具體可行的技術方案。

關鍵字：內空變位監測、變形分析、光達、現地特徵、最小距離投影法

ABSTRACT



Monitoring tunnel deformation is a crucial task for assessing long-term safety of a tunnel. This task requires an accurate and high-resolution spatial technique to precisely retrieve the abnormal signals on a tunnel surface. Among many measurement techniques in monitoring tunnel deformations, the Light Detection and Ranging (LiDAR) technique is capable of collecting spatial data automatically and rapidly. Although raw LiDAR dataset contains useful and important information, it lacks explicit geometric interpretation. In this study, an efficient approach for establishing a tunnel model to analyze deformation signal with multi-epoch LiDAR datasets is presented. By utilizing in situ control features, tunnel profiles (2D model) and 3D tunnel model from multi-epoch LiDAR datasets can both be expressed in a common reference frame definition. Then the minimum-distance projection (MDP) algorithm is proposed to estimate the 2D and 3D deformation signals on a tunnel surface. Furthermore, a rigorous covariance propagation approach is introduced to provide explicit quality indications on the obtained solution. Based on the results of simulation tests and a real case study of Hsuehshan (Xueshan) Tunnel, it has been shown that the LiDAR technique makes possible an efficient and accurate solution for monitoring tunnel profile deformations when the proposed approach is implemented in such task.

Keywords: tunnel deformation analysis, deformation signal, Light Detection and Ranging (LiDAR), in-situ features, minimum-distance projection (MDP)

目 錄



口試委員審定書	I
誌謝	II
中文摘要	III
ABSTRACT	IV
圖目錄	VII
表目錄	IX
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機	1
1.3 研究目的與方法	2
1.4 論文架構	3
第二章 研究背景	4
2.1 隧道安全等級	4
2.2 現有隧道變形監測技術	5
2.2.1 傳統量測技術	6
2.2.2 攝影測量技術	8
2.2.3 三維雷射掃描技術	10
2.3 三維雷射掃描技術相關背景	12
2.3.1 測距原理	13
2.3.2 掃描方式	14
2.3.3 光達載台種類	14
2.3.4 光達資料特性	16
2.3.5 光達主要後處理程序	19
2.3.6 整合不同測站點雲之方法	21

第三章	研究方法	23
3.1	利用現地特徵整合光達多測站資料.....	23
3.2	隧道二維變形分析模型.....	26
3.2.1	光達資料預處理.....	27
3.2.2	隧道斷面範圍擷取.....	28
3.2.3	隧道斷面模型建立.....	29
3.2.4	隧道斷面變形訊號比對.....	32
3.3	隧道三維變形分析模型.....	36
3.3.1	光達資料預處理.....	36
3.3.2	三維變形訊號比對.....	36
3.4	品質評估.....	37
第四章	數值驗證與分析	40
4.1	模擬實驗.....	40
4.1.1	隧道點雲模擬.....	40
4.1.2	不同取樣對可偵測之變形量影響.....	41
4.1.3	基準期密度對變形分析結果的影響.....	42
4.2	實例應用—雪山隧道點雲變形分析.....	45
4.2.1	實驗配置及事前規劃.....	45
4.2.2	二維變形模型分析.....	47
4.2.3	三維變形模型分析.....	54
第五章	結論及建議	57
5.1	結論.....	57
5.2	建議及未來工作.....	58
	參考文獻.....	61
	附錄.....	64



圖目錄



圖 2.1 導線測量形式.....	7
圖 2.2 雪山隧道網形設計(賴彥儒，2013).....	7
圖 2.3 單站自由測站法示意圖(賴彥儒，2013).....	8
圖 2.4 相機、像點及物點共線(修改自 Mikhail <i>et al.</i> , 2001).....	9
圖 2.5 影像剖面法成像示意圖(陳家輝，2011).....	9
圖 2.6 隧道內部現場實際影像.....	10
圖 2.7 控制點及共軛球分佈圖(陳國永，2004).....	11
圖 2.8 光達測距原理.....	12
圖 2.9 雷射測距原理(Wehr and Lohr, 1999).....	13
圖 2.10 光達掃描方式.....	14
圖 2.11 不同載台種類之光達.....	15
圖 2.12 點雲無法提供外顯幾何資訊。.....	16
圖 2.13 不同測站建立於不同區域坐標系統(江怡萱等，2011).....	17
圖 2.14 光達點雲精度與投影幾何之關係.....	18
圖 2.15 光達掃描之遮蔽效應.....	19
圖 2.16 資料萃取度及資料細節度示意圖.....	20
圖 3.1 線特徵之方向向量.....	24
圖 3.3 線狀分布點雲及面狀分布點雲之主要向量.....	26
圖 3.4 光達點雲車行(里程)方向改正.....	28
圖 3.5 斷面範圍擷取示意圖.....	28
圖 3.6 隧道點雲斷面局部示意圖.....	30
圖 3.7 斷面點之示意圖.....	30
圖 3.8 擷取出之原始斷面模型.....	30
圖 3.9 點雲夾角示意圖.....	31

圖 3.10 經過內插補點後之完整斷面模型	32
圖 3.11 不同時期原始模型之部分擷取	33
圖 3.12 不同時期原始模型之比對	33
圖 3.13 基準期內插點示意圖	34
圖 3.14 二維模型分析方法流程	35
圖 3.15 隧道三維模型變形訊號比對	37
圖 4.1 Optech ILRIS-3D	40
圖 4.2 隧道模型 T0	41
圖 4.3 隧道模型各點的精度	41
圖 4.4 不同取樣與變形假訊號量之關係	42
圖 4.5 取樣間隔不同的隧道模型	43
圖 4.6 以不同取樣間隔隧道建立之二維斷面模型 T02D 及 T12D 為基準期的變形量 分析結果	44
圖 4.7 Z+F 5010	45
圖 4.8 標準變形模擬物	46
圖 4.9 實驗目標精度評估	46
圖 4.10 實驗流程圖	47
圖 4.11 實驗現場影像	47
圖 4.12 實驗掃描獲取之原始點雲	48
圖 4.13 隧道變形區塊之光達原始點雲(側視圖)	49
圖 4.14 NISLT 所需特徵及其位置	50
圖 4.15 不同時刻掃描結果之原始斷面模型	51
圖 4.16 原始斷面模型及變形訊號量	53
圖 4.17 三維變形模型變形訊號量	55
圖 5.1 斷面模型與行車方向垂直	59



表目錄



表 2.1 隧道斷面變形速度判斷基準.....	5
表 2.2 安全檢測階段隧道等級分類表.....	5
表 2.3 測量方法之優缺點比較.....	12
表 4.1 Optech ILRIS-3D 儀器規格.....	40
表 4.2 不同基準期的變形量.....	44
表 4.3 實例應用之實驗配置.....	45
表 4.4 二維變形模型變形訊號量.....	53

第一章 緒論



1.1 前言

臺灣位處環太平洋地震帶上，無時無刻都處於地震的威脅之中，且地震所造成的災害不僅是直接影響到結構物本體的安全，更可能間接造成人民財產的損失，尤其近年來的幾次大地震，例如九二一地震及三三一地震均造成了重大的災情，因此對於結構物即時的監控及維護是預防災害的重要工作。此外，由於臺灣多變的地形環境，為了連絡各地發展出更便利的交通網絡，勢必會因須穿過山脈而建設隧道。臺灣在建設隧道工程的技術及經驗雖相當豐富，但對於完成工程後運行中的隧道之監測和維護作業仍有改進空間。目前較普遍使用的接觸式檢測方法例如應變計、沉陷儀、應力計等，需要將儀器放置於待測物表面，且單次測量僅能獲取單點資料，因此耗時費力且易受到現地環境影響。而非接觸式檢測方式主要是以全測站獲取三維點位資料，雖不須直接接觸待測物但同樣單次測量僅能獲取單點資料，故仍耗時費力。此外，針對整體監測工作及結果的需求，工程應用的監測方式應同時考量下列五點：高精度、全面性、即時性、現地可適應性及軟體成本，但目前的監測方式難以同時達到上述需求。依此，本研究提出以雷射掃描技術進行高精度的監測工作，發展出可快速獲得符合精度規範之分析結果的變形分析模式，並提出品質評估做為可靠度的依據。

1.2 研究動機


由於隧道屬於地下結構物，故只能藉由隧道內部的變化評估隧道的安全性，但為了加強隧道的強度及美觀目的，通常在隧道內壁會增加一層襯砌做為保護，因而更增加隧道安全判斷的難度。目前針對隧道安全的檢測項目中主要分為襯砌異狀及變形兩類，前者可以目視判釋，後者則須仰賴儀器測量。現行針對隧道監測方法的研究中，非接觸式的方法較不受現地環境影響，其中較經濟快速的方法有影像剖面法及三維雷射掃描。前者是以攝影測量的技術，配合影像剖面法的理

論基礎進行隧道變形的分析；後者是以儀器直接獲取實際物空間中的三維點位資料再搭配適當的後處理程序完成隧道變形分析。

過去，三維雷射掃描儀價格昂貴，掃描時間甚長，且精度及解析度亦不佳，因此不適合用於工程監測應用上，但近年來由於科技進步，三維雷射掃描不但價格相較低廉及掃描時間大幅降低，其精度及解析度更有顯著提升，故其可一次快速獲得空間中三維點位資料的特性日益受到重視，然而龐大的資料量是另一延伸問題，大量的資料除了增加後續分析的處理時間外，實務上欲存檔建立資料庫亦會造成許多負擔和問題，故要如何以有效的後處理程序從中獲取所需資訊即是關鍵。

1.3 研究目的與方法

前人研究中，隧道變形監測的傳統測量方法是於隧道口外之已知點引入隧道內，以導線及水準測量得知隧道內控制點及監測點坐標，再以三維雷射掃描儀掃描待測目標，相鄰兩測站間至少三個共軛點方可將所有點雲整合至相同基準下，最後以後處理軟體擷取斷面進行斷面變形分析。由於隧道內無法以 GPS 量測控制點坐標，因此需要由隧道口外之已知點引入，然而公路隧道長度動輒數百公尺至數公里，經誤差累積後的各點量測結果可能會有較大的不確定性，但隧道可容許變形度小，故此法於程序上雖無瑕疵，然其結果可能不符隧道監測所需。此外，監測工作是為了維護隧道穩定以保障使用者的安全，但進行監測工作的同時也應該盡可能降低對使用者的影響，故應儘量減少量測時間。三維雷射掃描技術可快速提供大量具有三維點位坐標資料之特性，符合隧道監測工作中對於時效性的需求，然三維雷射掃描技術獲取之點雲資料的精度受到儀器精度的影響，為了有效率的獲取符合隧道監測要求之精度的量測資料，以完成監測工作，應於事前規劃測站擺設位置。有鑑於此，本研究目的為如何快速有效的處理三維雷射掃描儀的量測資料並發揮原始資料的應有品質及達到監測所需的精度。



本研究中，獲取點雲資料時不需事先於現地場景中佈設控制點、特徵物等，只考慮遮蔽效應的情況下決定測站位置。獲取各測站之點雲資料後，再以可利用現地特徵及不須迭代計算的方式整合不同測站間的點雲，最後藉由建立原始模型的方式計算各點間於不同時間掃描之軸向長度變化獲取斷面變形資訊。

1.4 論文架構

本論文共可分為五章。第一章為緒論，闡述本研究之前言、研究動機及研究目的與方法。第二章為研究背景，本章分為三個部分，首先介紹隧道監測工作的特性及隧道安全等級分類依據，其次回顧前人對隧道監測工作方法之研究，最後介紹三維雷射掃描儀、其獲取之資料特性及整合不同測站點雲之方法。第三章為研究方法，介紹整合不同測站之數學模型，並且建立隧道斷面變形偵測之方法。第四章為數值驗證與分析，設計模擬實驗進行實驗流程的最佳化，並規劃實際實驗以驗證研究方法的可行性，藉由蒐集現地資料後進行變形訊號量及其精度之分析與探討。第五章為結論及建議事項，根據本研究之成果提出結論及建議。

第二章 研究背景



2.1 隧道安全等級

監測為定期或不定期對監測目標進行量測，並比較不同時期監測目標的變化及找出發生變化的原因，進而達到監測目標安全性的評估。因變化的程度會影響監測目標的安全穩定性，故須提供量化的指標做為狀況應變的基準。臺灣目前針對隧道的監測項目種類繁雜，主要可分為襯砌異狀及變形兩大類。襯砌異狀主要仰賴工程師的目視觀察及經驗判斷，例如龜裂、滲水、白華等現象，其嚴重程度及是否有立即修復之必要性均是以工程師的經驗判斷做為執行標準。變形項目主要是監測隧道局部或整體的承载力是否發生變化，其改變可能造成隧道功能降低或影響行車安全。通常承载力變化會直接反應於隧道的形狀改變，即發生變形現象，然而變形的幅度通常為漸進式變形，且可容許變形量小，因此需以儀器量測後再加以判斷。

依據黃燦輝與鄭富書(1997)提出的隧道斷面變形速度判斷基準(見表2.1表2.2)，可依變形速率分為甲、乙、丙、丁四個等級。甲級安全性最佳，可容許變形速率為1mm/年；丁級安全性最差，其變形速率達10mm/年。隨後，黃燦輝等(2008)更進一步提出隧道安全等級分類表(見表2.2)，是以隧道之安全性及是否能維持隧道原有功能為依據，並參考異狀之進展狀況及特徵綜合判斷。以安全性而言，甲級安全性最佳，丁級安全性最差；以修復緊急性(需立即修復)而言依次為丁、丙、乙、甲。

由表2.1及表2.2可知隧道安全性的評估中，變形量應在1mm以下方可列為安全等級，只需維持例行性的監測工作；超過1cm以上則可能發生立即性的危險，需立刻採取補救措施。然而透過傳統量測方式，其誤差可能已經超過1cm的標準，難以達到災害預防之目的，故綜合表2.1及表2.2之規準，監測隧道之量測結果的精度應至少達到3mm方能有效達到監測目的。

表 2.1 隧道斷面變形速度判斷基準(黃燦輝與鄭富書，1997)


部位	位置	變形速率				隧道等級
		>10mm/年	3-10mm/年	1-3mm/年	<1mm/年	
襯砌	斷面內				V	甲
洞門				V		乙
路面			V			丙
路肩		V				丁

表 2.2 安全檢測階段隧道等級分類表(黃燦輝等，2008)

隧道等級	判定因素				處理對策之緊急性
	對用路人及車輛安全之影響	對結構物安全之影響	對維護管理作業之影響	異狀之程度	
甲	目前尚無影響	目前尚無影響	幾乎無影響	輕微	無異狀或異狀輕微，須進行監視或平時檢查。
乙	將來會變成危險	將來會變成重大	中等	異狀進行中，有功能降低之可能。	有異狀之發生，將來可能達到丙等級，須進行重點監視，及擇期實施處理對策。
丙	遲早造成威脅，異常外力作用下危險	遲早會變成重大	大	異狀進行中，功能亦持續降低中	有異狀之發生且持續進行中，須儘快採取處理對策。
丁	危險	重大	明顯	重大	異狀嚴重，對路人及車輛造成危險，須立即採取處理對策。

2.2 現有隧道變形監測技術

隧道變形監測之方法主要為內空變位監測，即以斷面為單位，利用各種儀器及技術獲取斷面資訊，進一步比較不同時期同一斷面是否有幾何上的變化。目前現



有量測斷面資訊之儀器及方法可分為非接觸式及接觸式，考量監測工作之特性及條件，非接觸式量測可於一定距離範圍內(依儀器規格之限制)獲取全面性的監測資料，因此較符合監測工作之便利性需求，故本節進一步分析較適合實務的非接觸式量測方式。

2.2.1 傳統量測技術

目前隧道的變形監測方式主要採用全測站進行量測，其作法為在欲量測的隧道選取幾個斷面，並於每個斷面分別設置固定監測點位，及於隧道兩側地面上設置沉陷點位，完成點位設置後以導線測量獲取各點三維坐標，最後以數值分析或建立隧道模型進行斷面變形分析(林柏宏，2012)。

導線測量分為展開導線、閉合導線及附合導線三種形式(見圖 2.1)。展開導線因無法得知其精度，故不適用於精度要求高的隧道監測工作；閉合導線需形成一封閉多邊形，且網形的幾何性會影響其成果精度，但隧道屬於狹長形，故其網形的幾何性較差，量測精度也會受到影響；附合導線需於隧道兩端的隧道口外均有控制點，方能完成導線測量並知其成果精度，但此條件較難達成，通常需另行測量控制點坐標。此外，依據地籍測量實施規則(2011)，導線測量等級分為一等至四等(見附表 A.1)，其精度規範為 $0.04\sqrt{k}$ (m) 至 $0.8\sqrt{k}$ (m)，其中 k 為導線長度，單位為公里。若以雪山隧道為例，其總長約 12.9 公里，以一等導線精度計算約為 14 公分，四等導線精度計算約為 287 公分，此精度都未達 2.1 節所述之隧道安全規範 (3mm)，且等級愈高之導線的測量條件要求愈高，也愈花費人力及時間，難以達到工程監測的目標及需求。

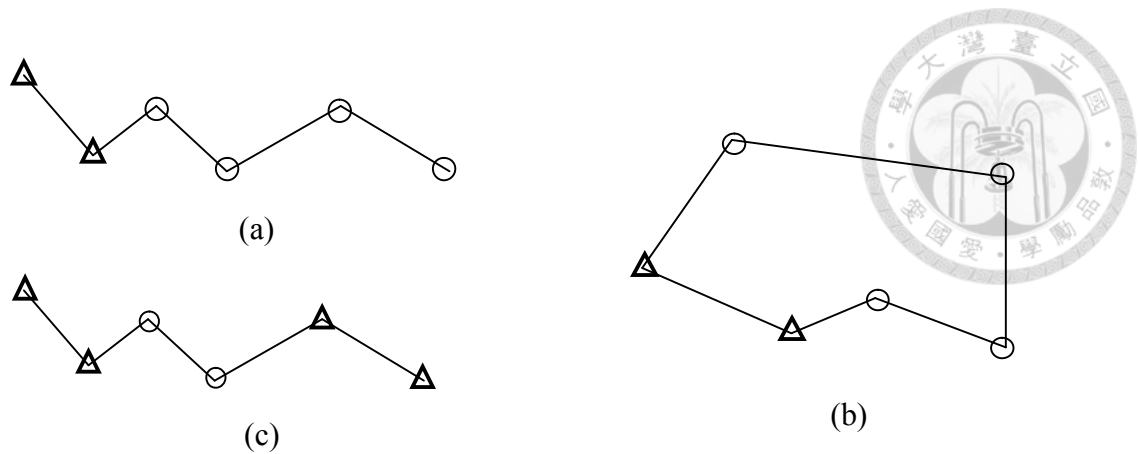


圖 2.1 導線測量形式。(a)展開導線 (b)閉合導線 (c)附合導線，三角形為已知點，圓形為未知點

有鑑於以全測站進行量測易受導線形式的限制，賴彥儒(2013)於其研究中以雪山隧道為監測目標，提出以加密控制網(見圖 2.2)及自由測站法(見圖 2.3)提高量測精度，其分析結果可達安全檢測標準中之丙級分類。然而全測站單次測量僅能獲得單點坐標，且需事先於隧道內布置規標，因此監測結果雖可達監測所需精度，但僅能獲取特定斷面(有設置規標)監測點之坐標且無法獲得完整斷面資訊。

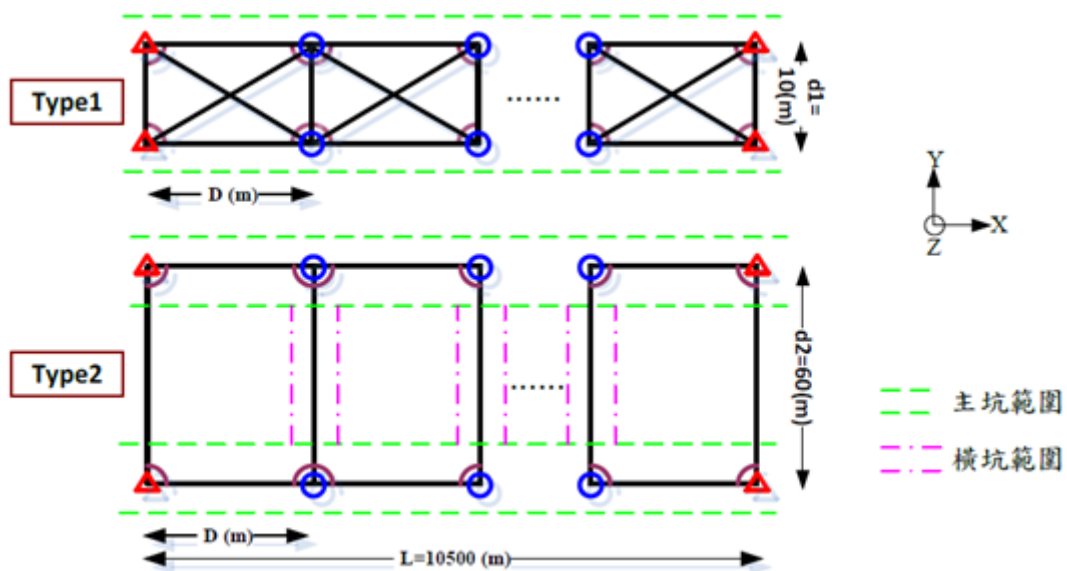


圖 2.2 雪山隧道網形設計(賴彥儒，2013)

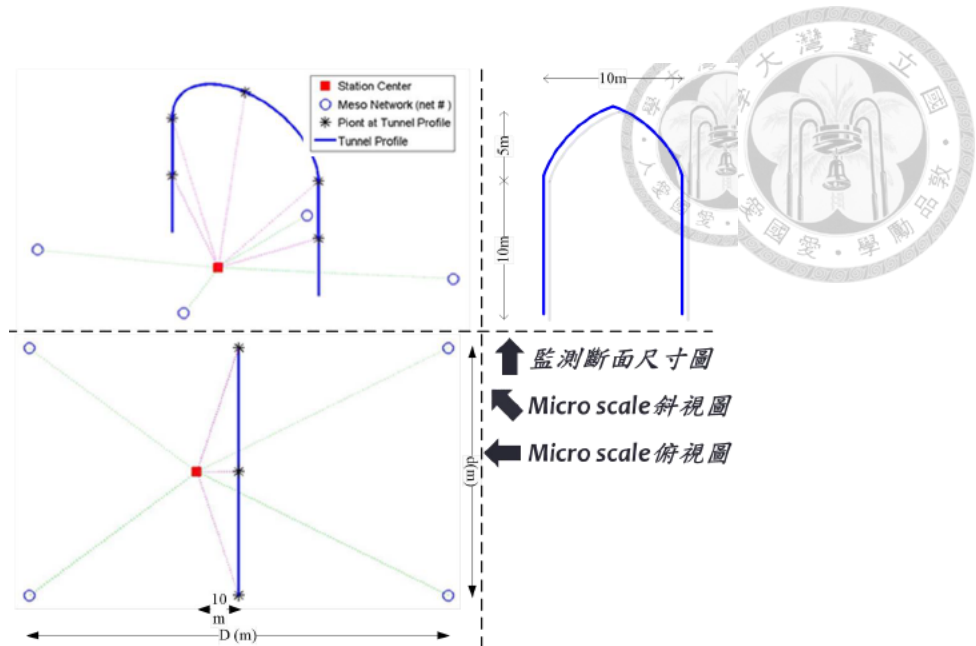


圖 2.3 單站自由測站法示意圖(賴彥儒，2013)

綜觀傳統測量技術之限制，由於各點位的設置需仰賴測量人員的經驗，因此人力方面的消耗及限制較大，且為了便於共同分析不同時期的測量結果，通常會由隧道口外的控制點，引入隧道內完成導線測量，但隧道通常距離不短，導線測量結果可能因誤差累積或控制點精度不符規範，造成結果判釋的困難。因此這樣的監測方式不僅費時費力，其成效更有待商榷。

2.2.2 攝影測量技術

攝影測量主要分為航空攝影測量及近景攝影測量，但受到隧道地形限制，航空攝影測量無法完成隧道監測工作，近景攝影測量則可。攝影測量之基本原理為利用測量交會方法，如圖 2.4 所示，當投影光線通過透視中心、像點及對應點之三維空間物點時，三點共線之特性，利用共線方程式(collinearity equation)進一步描述之，當具有兩張以上像片之重疊區有共軛點時，可獲取物空間坐標。但除了共軛點坐標外，尚需相機之內方位參數及外方位參數，方可獲得正確的物空間三維坐標。由於基本攝影測量技術需以多張相片才能獲取重疊區內的物空間坐標，故影



像拍攝時重疊區的大小及影像張數都會影響監測工作的效益，對於監測工作而言有較大的負擔，故近年發展出以攝影測量為基礎的改良技術，如影像剖面法。

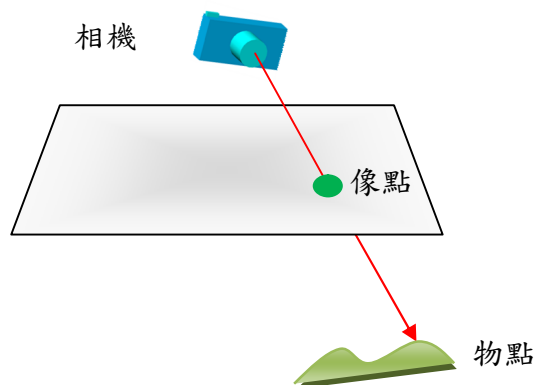


圖 2.4 相機、像點及物點共線(修改自 Mikhail *et al.*, 2001)

影像剖面法源於 Capart *et al.*(2002)及 Douxchamps *et al.*(2005)提出應用於觀察地下水行為而建立的理論。曹峻璋(2006)據此提出以影像剖面法作為理論基礎進行隧道監測的測量方式。邱雅筑等(2007)、許志豪(2008)、李晉榮(2011)更依其理論基礎進行方法改良。此法的測量方式如圖 2.5 所示，先於隧道襯砌以雷射線標示控制點，並以全測站測量控制點之三維坐標，其次利用已得知相機參數之相機攝入有雷射線標示的隧道內壁，最後藉由影像的分析獲得隧道斷面資訊，並進一步進行分析比較。

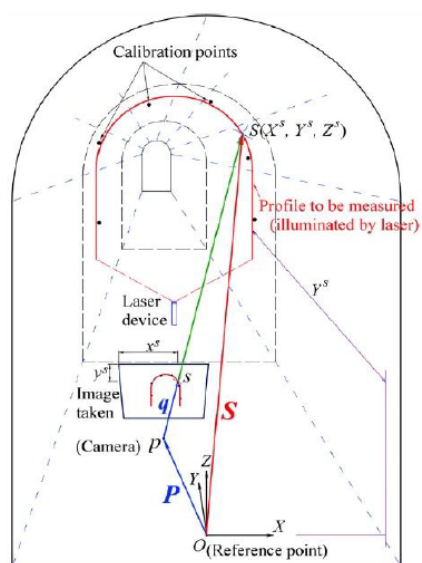


圖 2.5 影像剖面法成像示意圖(陳家輝，2011)

以影像進行分析的優點係相機為易取得之儀器，且便於操作，影像分析之理論亦相當成熟，此外影像可記錄隧道襯砌之顏色變化或裂縫程度，為其他監測儀器所無法具備之優勢。然而以相機拍攝影像進行分析，需要考量現地環境的明暗度，圖 2.6 即為無閃光燈且現地環境昏暗的條件下拍攝，可見影像呈現結果並不佳，但相同條件下加入閃光燈拍攝，影像剖面法程序中的雷射線便無法攝入影像中，難以進行後續分析。此外，相機需於監測前先率定相機的相關參數，控制點亦須以全測站進行量測，故上述原因都可能造成影像最終分析結果的誤差，且監測前的前置作業繁雜費時，故欲於實務上廣泛應用仍有難度。



圖 2.6 隧道內部現場實際影像

2.2.3 三維雷射掃描技術

陳國永(2004)提出以三維雷射掃描儀搭配全球定位系統(GPS)建構隧道模型，藉由不同時期之模型變化判斷隧道的安全性，進而達到監測目的。首先佈設 GPS 控制點、隧道監測點及沉陷監測點，GPS 控制點係作為三維雷射掃描之共同控制點，隧道監測點及沉陷監測點則是以傳統測量方式進行觀測。完成布點後即以三維雷射掃描儀掃描目標區獲取監測資料，不同測站間掃描資訊是以控制球進行套合，再將模型中的雜訊點雲清除，進而得到一完整的隧道點雲模型。最後利用不同時期的隧道模型進行變形量的比較及分析。

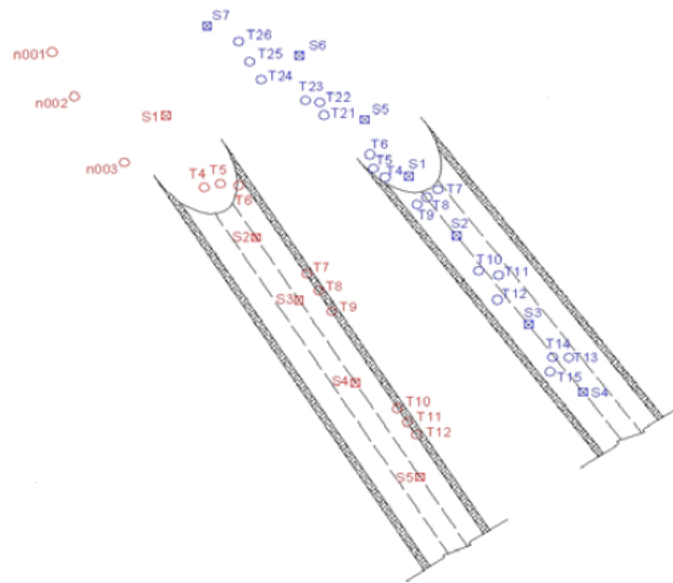


圖 2.7 控制點及共軛球分佈圖(陳國永, 2004)。n 為 GPS 控制點, S 為測站位置, T 為共軛球位置

此方法雖可建立良好的隧道模型,但依據控制點、測站及共軛球位置分布圖(見圖 2.7),顯示其測量程序較繁瑣,耗費時間,且考量施作過程極有可能產生超過監測規範的誤差。例如由隧道外的 GPS 控制點引入隧道內,可能會因為距離的增加而有誤差累積的問題;或是 GPS 控制點本身存有誤差,造成隧道內控制點的位置誤差。兩者狀況都可能造成不同時期的隧道模型,並非建立在相同的基準進行比較,因此分析而得的變形量可能數值或位置估計錯誤,進而造成修復工作或預防措施的誤判。

綜觀前述之監測方法均有其優缺點(見表 2.3),但以工程監測需求中之資料獲取的即時性及現地可適應性而言,三維雷射掃描儀可在短時間內獲取大範圍的資料,不僅可以快速得到數據進行變形分析,更可以降低監測時對使用者的影響,且在儀器的限制範圍能架設儀器便能進行掃描得到數據。基於以上因素,本研究選擇以三維雷射掃描儀進行隧道的變位監測。

表 2.3 測量方法之優缺點比較

(整理自 Wang *et al.*(2009)、邱雅筑等(2007)、王泰典等(2008)、江怡萱等(2011))

	全測站	攝影測量	三維雷射掃描儀
優點	1. 軟硬體成本低	1. 高精度 2. 軟硬體成本低 3. 操作簡便 4. 可辨識視覺上可預測的潛在危害(如滲水)	1. 高精度 2. 全面性 3. 省時 4. 現地可適應性
缺點	1. 量測費時 2. 誤差累積	1. 後處理程序較繁複 2. 受現地環境影響較大 3. 誤差累積 4. 遮蔽造成資訊不完備	1. 離散點雲 2. 軟硬體成本高 3. 誤差累積 4. 遮蔽造成資訊不完備

2.3 三維雷射掃描技術相關背景

雷射掃描儀又稱光達(Light Detection and Ranging, LiDAR)，是一種藉由發射雷射光的方式對待測物進行掃描，接收經待測物反射後回到儀器的訊號及訊號的強度值(Intensity)，利用相位或時間差的計算，進而得到待測物表面的三維點位資料，而這些三維點位資料即稱之為點雲(Point Cloud)。圖 2.8 顯示光達以儀器所在位置為原點(x_0, y_0, z_0)，藉由(2-1)式測量距離 ρ 、水平角 h 及垂直角 ν 計算出物點的三維坐標(x, y, z)。

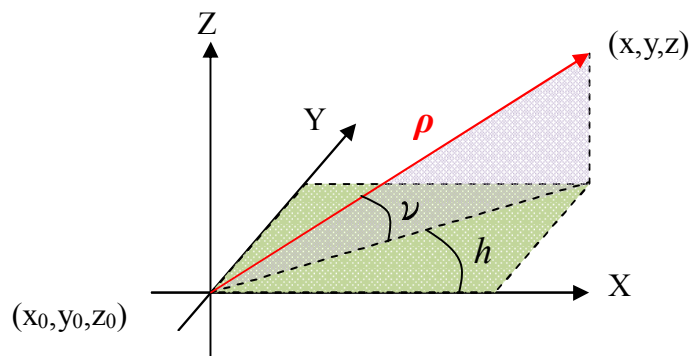


圖 2.8 光達測距原理



$$\begin{aligned} x &= \rho * \cos(\nu) * \cos(h) \\ y &= \rho * \cos(\nu) * \sin(h) \\ z &= \rho * \sin(\nu) \end{aligned} \quad (2-1)$$

由於光達具有可以快速自動收集三維空間資訊的特性，且其精度可以達到公釐級，故此優點常被用於工程應用及科學研究上。然而光達的原始資料雖具有豐富的空間資訊，但要實際應用及分析時都需要再做後處理以萃取出有用的資訊。

2.3.1 測距原理

雷射測距的基本原理為利用雷射光發射與接收反射光往返待測物表面的時間差或相位差，進而求得雷射光源與待測物間的距離(Wehr and Lohr, 1999)。目前的雷射測距系統可分為兩類，脈衝式雷射測距(Pulse Ranging)及連續波式雷射測距(Continuous Wave, CW)。前者是利用時間差測得距離，後者是利用相位差測得距離。

圖 2.9(a)為脈衝式測距，(b)為相位式測距。

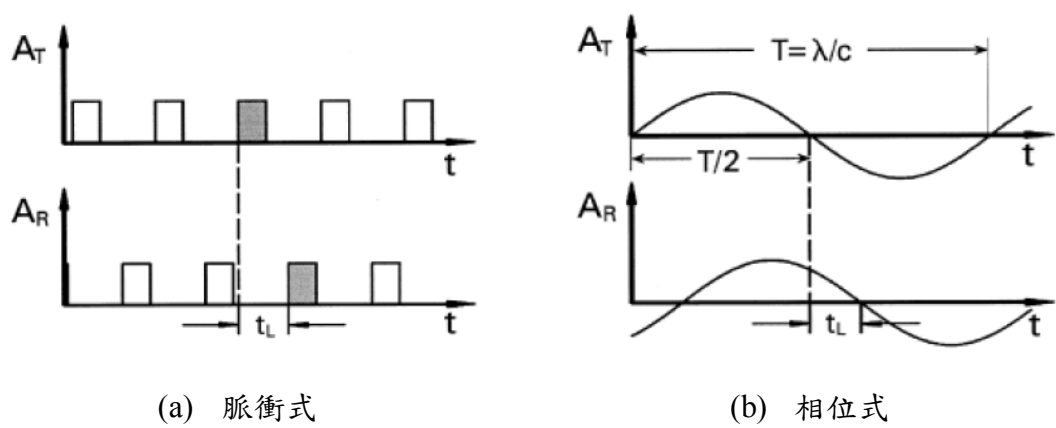


圖 2.9 雷射測距原理(Wehr and Lohr, 1999)

(2-2)式及(2-3)式分別表示脈衝式及連續波式的測距公式。

$$S = \frac{1}{2} c \Delta t \quad (2-2)$$

$$S = \frac{\lambda \Delta \phi}{4\pi} = \frac{1}{4\pi} \frac{c}{f} \phi \quad (2-3)$$

其中 S 為距離，c 為光速， Δt 為時間差， λ 為波長，f 為頻率。由(2-2)式及(2-3)式可知，連續波式之雷射的測距精度會受到頻率 f 及相位解析度 ϕ 的影響，而脈衝式



之雷射的測距精度只會受到時間差的影響，因此目前的地面光達大多是以脈衝式雷射為主(呂曜宇，2008)。

2.3.2 掃描方式

除了儀器本身的掃描原理不同外，掃描的方式也分為橫掃式及縱掃式兩種(見圖 2.10)。橫掃式又稱為定向式，即光達掃描時固定方向，透過儀器內的水平及縱向旋轉稜鏡可得到一矩形的掃描範圍。而縱掃式又稱本體旋轉式，儀器內部只有一個縱角旋轉稜鏡，其水平視角範圍為 360° ，垂直視角範圍為 80° - 180° ，其掃描範圍較大，可減少測站變換的次數。

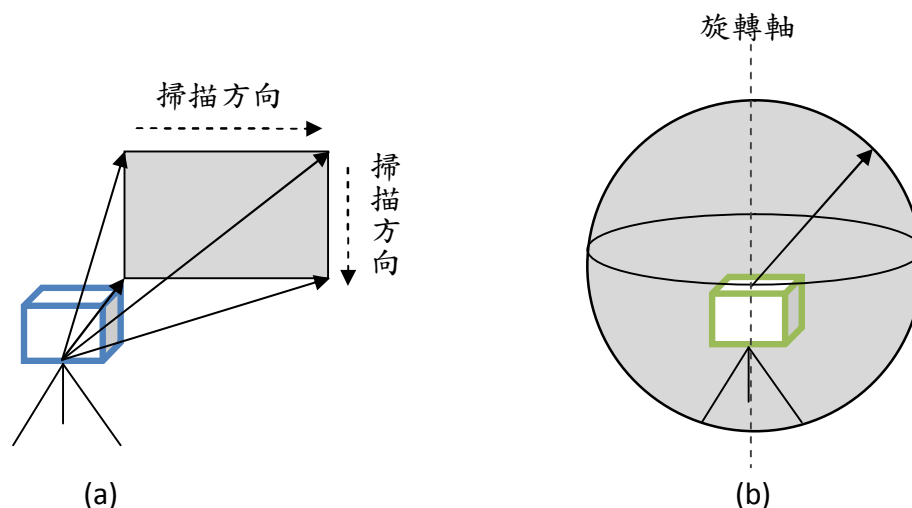


圖 2.10 光達掃描方式 (a)橫掃式 (b)縱掃式(修改自呂曜宇，2008)

2.3.3 光達載台種類

光達依據不同的載具可分為空載光達、地面光達及移動載台光達(見圖 2.11)。空載光達為將光達置於飛行機具上再搭配全球定位系統(Global Positioning System, GPS)及慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)，以直接地理定位的方式，可一次觀測大範圍的區域，並於獲取點雲資料的同時，將點雲轉換至地面坐標系中，常見之應用有數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM) 的生產、崩塌地判釋、邊坡穩定度分析、三維道路模型的建置等等(黃建銘，2009)。



(a)

(b)

(c)

圖 2.11 不同載台種類之光達。(a)空載光達(Optech Incorporated, 2006)，(b)地面光達(Zoller + Fröhlich GmbH, 2012)，(c)移動載台光達(Optech Incorporated, 2006)

相較於空載光達，地面光達的掃描範圍較小，但能提供更詳盡的地形地物資訊，故常被應用於古蹟保育、管線重建、大型工程監測等等。然而地面光達通常不搭載 GPS 及 INS，故其點雲坐標資料是建立在以儀器為中心的區域坐標系統中，因此各測站間的坐標系統不同，通常需要先進行點雲資料的整合方能應用。

移動載台光達於此是指將光達置於地面上的移動載具，與空載光達相同，通常具有 GPS/INS 可以直接地理定位的方式將點雲轉換至地面坐標系中，其掃描範圍介於空載光達及地面光達之間，且同樣可提供詳盡的地形地物資訊，為目前發展中的技術。

綜合而論，空載光達及移動載台光達都能直接提供具有絕對坐標的點雲資訊，但其精度會直接受到 GPS/INS 儀器本身的精度影響，儀器本身有誤差時會反應在各點坐標值中。另外，空載光達因掃描距離長，故空間解析度較差，依據儀器精度不同其解析度為數公尺不等，因此不適合精度要求較高的工程應用中；移動載台光達因在地面進行掃描，故其解析度優於空載光達，但地面地形起伏大且會因遮蔽造 GPS 失鎖等問題，例如茂盛的植被、都市中林立的高樓大廈、行經隧道等，進而降低點雲坐標的精度。相較而言，地面光達掃描範圍較小，但點坐標精度只受限於儀器精度，且較不易受到現地環境影響，故適合用於精度要求較高的工程應用。



2.3.4 光達資料特性

光達提供原始觀測資訊為具有物空間三維坐標的離散點雲，此點雲具備以下四種特性：無法提供待測物的外顯幾何資訊、缺乏絕對資訊、因為投影幾何而造成的誤差放大、遮蔽效應造成資訊不完備。以下將逐點進一步說明。

點雲無法提供待測物的外顯幾何資訊

光達提供原始觀測數據為非指定的離散點雲，其幾何資訊隱藏於坐標資訊中，因此無法直接描述待測物明確的外顯幾何資訊，必須要透過適當的後處理程序，始能進行後續的分析與應用。圖 2.12 (a) 為實際光達掃描隧道獲取的點雲，黑色部分為隧道本體，加註顏色者為隧道本體外的現地特徵。圖 2.12 (b) 為隧道局部放大圖，可看出桃紅色部分為現地特徵，黑色部分為隧道本體，但實際點雲資料只有坐標值而無顏色區別，因此若無加註顏色標記時將無法判別任意點之屬性，更遑論描述各特徵之幾何形狀。一般點雲處理需有特徵萃取的程序，此階段係將隱性資訊轉為顯性資訊，可進行點雲套合、特徵比對、建立模型等後續程序，但特徵萃取需經過數學計算及擬合，容易喪失原始資料的微細資訊，而這些資訊卻可能是工程監測所需的重要訊息，例如微小的變形量可能會因為特徵萃取過程而消失，造成最終結果無法適時察覺異狀。因此如何有效利用光達原始資料中的隱性資訊為本研究的重要目的之一。

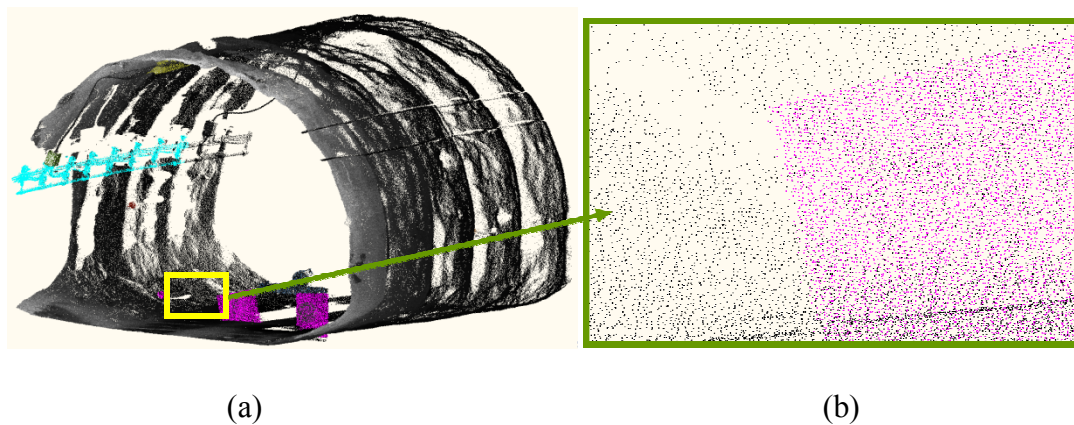


圖 2.12 點雲無法提供外顯幾何資訊。(a)隧道點雲圖，(b)局部放大圖。



缺乏絕對資訊

光達點雲資料的坐標系統是依據測站的初始位置及姿態所建立的區域坐標系統，因此所有的觀測量都是相對於測站的相對觀測量，本身並無絕對資訊。當光達置於不同測站對同一待測物進行掃描時，不同測站會以該測站之光達的初始位置及姿態建立不同的區域坐標系統，故不同測站之點雲坐標皆位於不同的區域坐標系統中(見圖 2.13)。

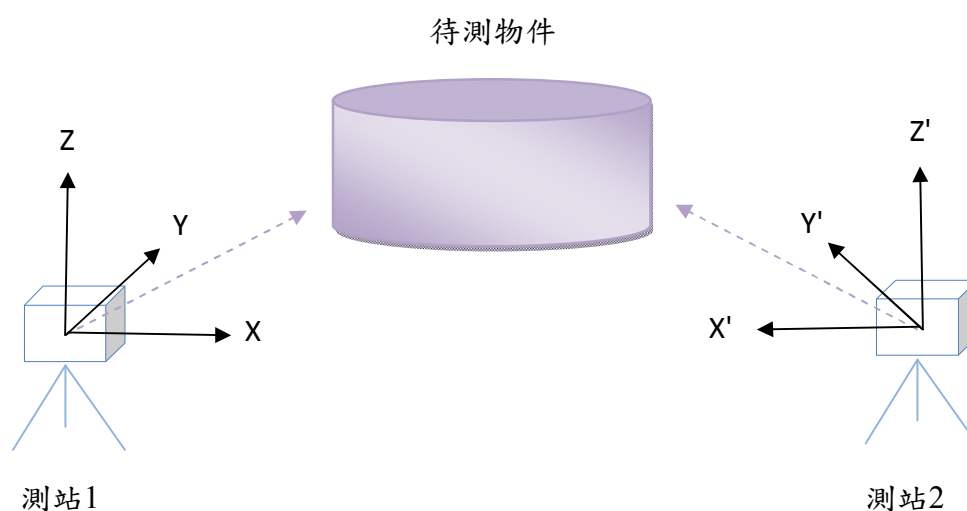


圖 2.13 不同測站建立於不同區域坐標系統(江怡萱等，2011)

因為投影幾何而造成的誤差放大

由於光達資料是經過測距及測角計算出待測點位與測站間的坐標向量，因此當測角及測距存在誤差時，此誤差會直接反映在坐標值中，且根據誤差傳播理論，當距離增加或是角度較大時，位置會因而產生較大的誤差。圖 2.14 顯示光達點雲誤差受到距離及角度的影響。二維的點雲誤差分佈圖顯示當中心點為測站位置，各點位與測站間的角度不同，距離則由近至遠逐漸增加，各點位之誤差向外輻射般逐漸變大(見圖 2.14(a))。三維的點雲誤差分佈圖顯示當測站位置為右下方，可看出各點與測站間之距離愈長時，其點位誤差也隨之增加(見圖 2.14(b))。若模擬一測站位置於(0,0,0)之半圓形隧道形成的點雲誤差分佈圖(見圖 2.14(c))，同一斷面上各



點與測站間之距離相同，角度不同，可看出當角度較大、距離增加時，其點位誤差也隨之增加。

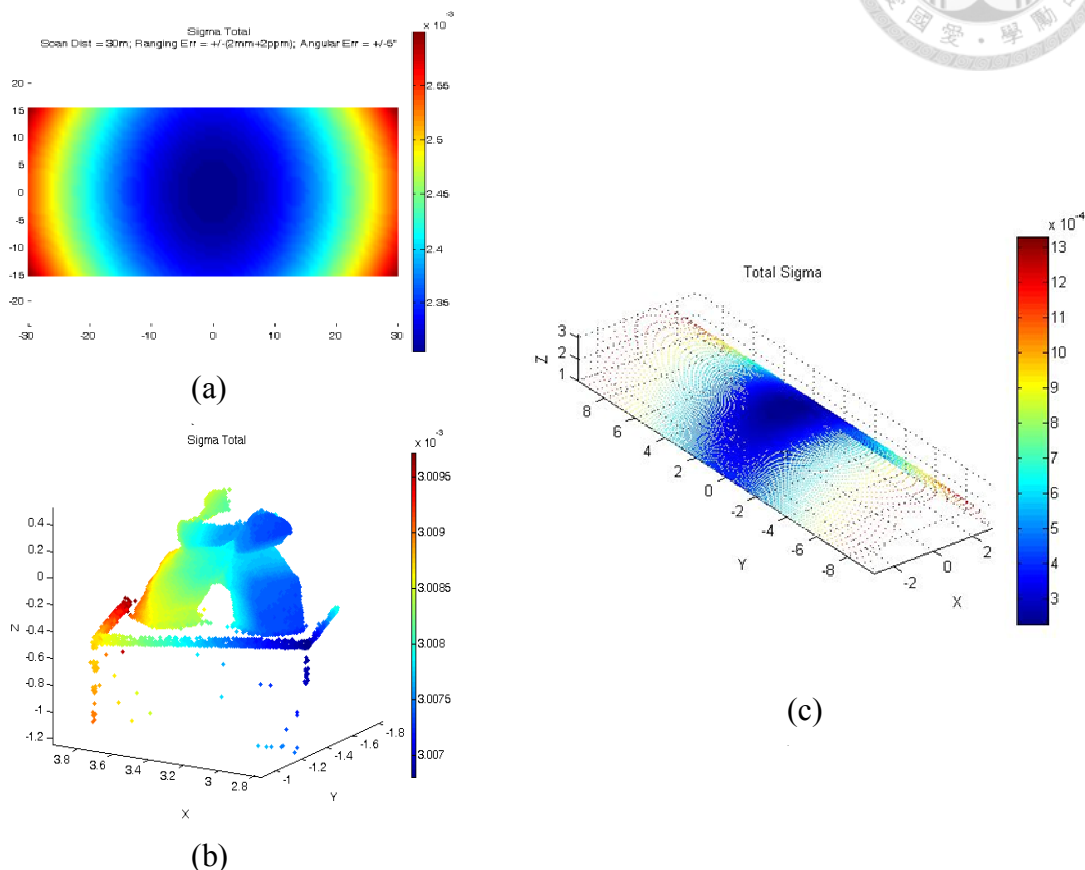


圖 2.14 光達點雲精度與投影幾何之關係 (a)二維及(b)三維待測物受測距及測角誤差影響下之點雲誤差分佈圖；(c)為隧道各掃描點的精度(江怡萱等，2011)

遮蔽效應造成資訊不完備

由於光達是以測站為中心呈放射狀對待測物進行掃描，當待測物的形狀不規則時，容易產生遮蔽效應使得測量過程中無法以單一測站完成掃描。遮蔽效應示意圖(見圖 2.15)顯示當待測物具有稜角或表面有許多特徵時，單測站所獲取之資料會有被遮蔽部分未被掃描，造成點雲有資料缺失的結果，如圖 2.12 中空白部分即為受到遮蔽效應而產生的資料缺失現象。因此，為了完整呈現待測物須以不同測站重新掃描以彌補資料缺失的部分。

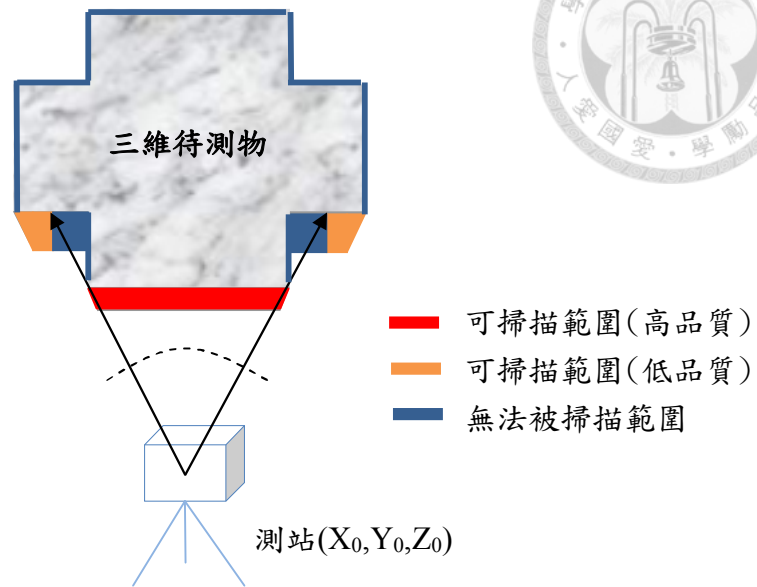


圖 2.15 光達掃描之遮蔽效應(江怡萱等，2011)

2.3.5 光達主要後處理程序

光達點雲因其資料特性，需經過完整的後處理程序始能獲得所需的資訊，其中兩個主要的後處理程序，分別為特徵萃取及多測站整合。

特徵萃取

由於光達原始資料點雲為離散點雲，無法直接得到待測物的幾何資訊，因此需要進行特徵萃取以得到明確的幾何資訊。特徵萃取的方法可分為兩大類，分別為資料導向(data driven)及模型導向(model driven)。資料導向是利用資料本身的幾何屬性與相位關係判定點雲的分類，再逐步建構各類幾何特徵，是一種由下而上的方式，其優點為不需要外部資訊，且其自動化程度高，而缺點為程序處理效率不佳且不適用於複雜的特徵萃取。模型導向是配合外部資訊確認待萃取之特徵的幾何種類，並利用最小二乘法估計模型參數萃取出所需的幾何特徵，是一種由上而下的方式，其優點為分析效率快速，且可適應較複雜的幾何特徵，而缺點則為



需要外部資訊及自動化程度較低。

特徵萃取可以得到光達原始資料無法提供的幾何資訊，但同時也可能會喪失部份的資料細節，而這些資料細節往往是工程監測上重要的資訊，但只使用光達原始資料又無法完成工程監測的任務，因此要取得適當的平衡才能有效應用於工程監測任務上。以隧道而言，其內部近似為一連續弧面，利用特徵萃取的方式可擬合出與之相符的平滑弧面，但擬合的過程會遺失實際上可能為變形量或異狀訊號的資訊，但此資訊為監測工作的重要指標。圖 2.16 所示即為由光達資料中萃取得到的特徵愈完整，原始資料中所隱含的細節資訊的遺失程度愈高。

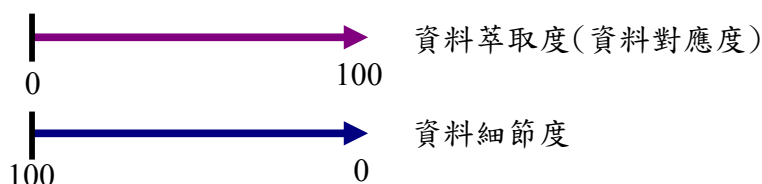


圖 2.16 資料萃取度及資料細節度示意圖

多測站整合

通常為了得到完整的待測物資訊，需要以多個測站位置對待測物進行掃描，或是以監測工作而言，需要進行多時期點雲的整合，而一般處理光達多測站資料的方法大致可分為兩大類，其一為輔以額外的感測設備以得到絕對資訊，即光達搭載 GPS/INS，其二為無絕對資訊，需使用共軛特徵或控制點。前者因為搭載 GPS/INS，故可直接得到測站的初始姿態及位置，進而得到不同測站間的轉換參數，且各點位具有絕對資訊，然而 GPS/INS 所得到的姿態及位置本身也因量測而有誤差，因此不同測站整合時會因誤差累積造成點位的誤差放大，而影響套合成果。後者使用共軛特徵或控制點進行轉換參數的計算即可避免上述的誤差累積問題，然而需要共軛特徵則必須於各測站間有一定的重疊掃描區，因而造成量測時間增加，以及特徵萃取的問題。



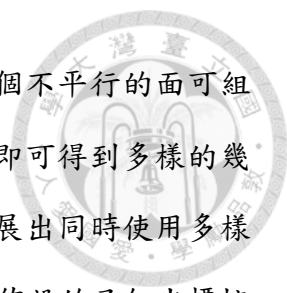
2.3.6 整合不同測站點雲之方法

控制點標法(Akca, 2003)是於待測物上佈設規標作為控制點，當相鄰的測站間同時掃描到三點以上共同的規標時，即可求解兩相鄰測站間的轉換參數。測站後視稜鏡法(曾義星與史天元，2002)的原理及方法與控制點標法相同，只是將作為控制點的規標以稜鏡替代。

迭代最近點法 (Iterative Closest Point, ICP) 是以點雲為基礎做為整合不同測站點雲的方式，其原理為迭代兩群點雲資料間之距離為最小的方式解算轉換參數。此法的優點為在無任何共軛點的情況下仍能解算出轉換參數，但因為需要以迭代方式計算，故計算效率差且需要良好初始值以避免收斂至錯誤的位置(蔡宗倫等，2008)。

由光達點雲中經特徵萃取而得的基本幾何特徵有點、線、面三種，整合不同測站之光達點雲時，依據不同種類的幾何特徵會有不同的處理及解算方法。劉燈烈(2004)利用航空攝影測量中的獨立模型法進行點雲資料的平差結合。將各測站的點雲資料分別視為獨立的單元模型，再觀測各個模型的控制點與連結點坐標，之後將觀測量代入平差模式中即可求出所有模型間的轉換參數。Habib *et al.*(2005)使用資料結合的方式進行轉換參數的解算。由立體像對中建立位於某坐標基準上的模型，並在模型及光達點雲中萃取共軛的直線特徵，由於模型及光達點雲中的共軛直線轉換至相同坐標系中時，兩直線應會共線，故根據此特性可以解算立體模型及光達點雲間的轉換參數，再將模型套合至點雲中即可達成不同資料的結合。以三維直線特徵進行光達點雲套合是將兩測站之光達點雲資料轉成二維影像，再由影像處理的方式萃取出三維線特徵，同樣根據共軛線經轉換後會共線的特性求取兩測站間的轉換參數(趙鍵哲與莊子毅，2008)。Gruen and Akca(2005)是以最小二乘法擬合平面得到法向量，再搜尋具相同法向量的共軛面特徵，進而求取兩群點雲間的轉換參數，但需要再加入強度值(Intensity)進行匹配(王名玉，2010)。

一般而言，由光達點雲中可萃取而得的幾何特徵不會只有單一種類，通常會



同時存在點、線、面三種，且三個互不平行的面可組成點，二個不平行的面可組成線，二不平行的線可組成點，故由單一測站所獲取的點雲中即可得到多樣的幾何特徵。為了避免單一特徵數不足而無法求解轉換參數，遂發展出同時使用多樣幾何特徵整合不同測站之點雲。黃建銘(2009)利用至少三個事先佈設的已知坐標控制點，及由光達點雲中萃取而得的各種幾何特徵，以最小二乘法一次性的求解出各測站間的轉換參數，並可直接獲得套合精度。非迭代線性轉換法(Non-Iterative Linear Transformations, NISLT)可同時使用各種幾何特徵及特徵點雲求解轉換參數，特徵點雲可直接選用實際場景中的現地特徵不須另外佈設控制點，首先將離散點雲組成方差-協方差矩陣後作奇異值分解得到特徵向量，再由多個特徵向量組成旋轉陣及平移矩陣即可完成套合(Han, 2010)。

前述提及之各種處理光達多測站資料的方法中，通常具有只利用單一幾何特徵或是需要進行迭代計算的特性。然而光達點雲的數據量龐大，以迭代法計算除該如何給定初始值外，更有計算效率不彰的問題。而光達點雲資料通常包含許多幾何特徵，若只採用其中一種則造成其他幾何特徵的浪費，且為了得到共軛特徵時必須要有一定程度的重疊區，或是要利用控制點就需要在現地佈設控制點，進而使得量測時間增加。因此雖然上述方法大多已發展成熟且有完整的誤差分析模式，但本研究希望能以可使用多種幾何特徵及非迭代計算的方式，增加光達多測站資料的整合效率，且若無控制資訊時也能有效完成多測站點雲套合的程序。



第三章 研究方法

由研究背景可知，隧道監測方法主要有傳統量測技術、攝影測量及光達。相較於其他監測方法，光達掃描目標時的作業空間及環境光源亮度之需求較低，具備工程監測作業之特性及需求的特點，且其價格高昂的缺點亦因近年科技進步而漸趨平價，尤其配合隧道結構體的特性，光達是較適合的監測方式。然而，光達原始資料的後處理程序是整個監測工作中，最重要亦是最複雜的一環，綜觀前人研究可知，後處理程序應用的理論及方法非常多元，但多數存有耗費時間、遺失部分原始資料資訊或有其他限制等問題。為了能使監測工作更有效率且監測結果符合監測規範，本研究利用現地特徵整合光達多測站資料，並建立二維變形分析模型及三維變形分析模型的程序，最後提供品質評估結果作為分析結果可靠度的依據。

3.1 利用現地特徵整合光達多測站資料

當兩群點雲來自光達的不同參考框架，並假設兩群點雲只存在剛體轉換而無變形或系統誤差時，可列舉出下式：

$$\mathbf{x}' = \mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{t}' \quad (3-1)$$

在(3-1)式中， \mathbf{x}' 及 \mathbf{x} 分別表示不同坐標系統的觀測量， \mathbf{R} 為旋轉矩陣， \mathbf{t}' 為平移矩陣。根據 Han(2010)，可以非迭代的方式計算出(3-1)式中的旋轉矩陣

$$\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{S}_a \mathbf{V}_a^T \quad (3-2)$$

(3-2)式中 \mathbf{S}_a 及 \mathbf{V}_a 皆為正交矩陣，由幾何矩陣 \mathbf{G} 經奇異值分解而得。幾何矩陣是由觀測量及其相對觀測量中，單位化列向量所堆疊而成的觀測量矩陣 \mathbf{K} 及 \mathbf{K}' 組成。

$$\mathbf{G} = \mathbf{K}'^T \mathbf{K} (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} = \mathbf{S}_a \mathbf{\Lambda}_a \mathbf{V}_a^T \quad (3-3)$$

由光達點雲組成單位化列向量所堆疊而成的觀測量矩陣有許多方式。



以共軛點為例：

$$\mathbf{v}_n = \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|} \quad \mathbf{v}'_n = \frac{\mathbf{x}'_i - \mathbf{x}'_j}{\|\mathbf{x}'_i - \mathbf{x}'_j\|} \quad (3-4)$$

其中 \mathbf{x}_i 及 \mathbf{x}_j ($i \neq j$) 為同一觀測量中的任兩個特徵點，而 \mathbf{x}'_i 及 \mathbf{x}'_j 為另一相對觀測量中的兩個共軛點。

以線特徵為例，可將方向向量表示為(3-5)式：

$$\frac{x-x_0}{l_a} = \frac{y-y_0}{l_b} = \frac{z-z_0}{l_c} \quad (3-5)$$

$$\frac{x'-x'_0}{l'_a} = \frac{y'-y'_0}{l'_b} = \frac{z'-z'_0}{l'_c}$$

其中 $\{l_a, l_b, l_c\}^T$ 及 $\{l'_a, l'_b, l'_c\}^T$ 分別為觀測量中，線特徵的方向向量及其共軛線特徵的方向向量。圖 3.1 中藍線為選取之線特徵，紅色箭頭即為其方向向量。

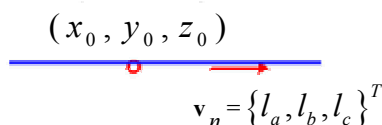


圖 3.1 線特徵之方向向量

將其單位化計算如(3-6)式：

$$\mathbf{v}_n = \frac{\{l_a, l_b, l_c\}^T}{\|\{l_a, l_b, l_c\}\|} \quad \mathbf{v}'_n = \frac{\{l'_a, l'_b, l'_c\}^T}{\|\{l'_a, l'_b, l'_c\}\|} \quad (3-6)$$

以面特徵為例，以平面方程式表示一平面，如(3-7)式：

$$Ax + By + cz = 1 \quad A'x' + B'y' + c'z' = 1 \quad (3-7)$$

其中 $\{A, B, C\}^T$ 及 $\{A', B', C'\}^T$ 為觀測量中面特徵及相對觀測量中共軛面特徵的法向量。圖 3.2 中藍色面為選取之面特徵，紅色箭頭為該平面之法向量。

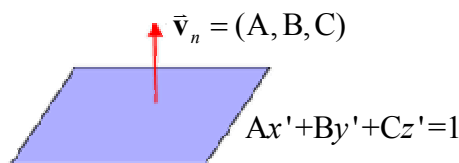


圖 3.2 面特徵之法向量



將其單位化計算如(3-8)式：

$$\mathbf{v}_n = \frac{\{A_a, B_b, C_c\}^T}{\|\{A_a, B_b, C_c\}\|} \quad \mathbf{v}'_n = \frac{\{A'_a, B'_b, C'_c\}^T}{\|\{A'_a, B'_b, C'_c\}\|} \quad (3-8)$$

以離散點雲為例，將兩群點雲之點位坐標分別組成方差-斜方差矩陣。

$$\mathbf{COV} = \begin{bmatrix} \text{cov}(\mathbf{x}) & \text{cov}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) & \text{cov}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \\ \text{cov}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) & \text{cov}(\mathbf{y}) & \text{cov}(\mathbf{y}, \mathbf{z}) \\ \text{cov}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) & \text{cov}(\mathbf{y}, \mathbf{z}) & \text{cov}(\mathbf{z}) \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

$$\mathbf{COV}' = \begin{bmatrix} \text{cov}(\mathbf{x}') & \text{cov}(\mathbf{x}', \mathbf{y}') & \text{cov}(\mathbf{x}', \mathbf{z}') \\ \text{cov}(\mathbf{x}', \mathbf{y}') & \text{cov}(\mathbf{y}') & \text{cov}(\mathbf{y}', \mathbf{z}') \\ \text{cov}(\mathbf{x}', \mathbf{z}') & \text{cov}(\mathbf{y}', \mathbf{z}') & \text{cov}(\mathbf{z}') \end{bmatrix}$$

其中 $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ 表示觀測量中各點在 x, y, z 方向上的坐標值， $\mathbf{x}', \mathbf{y}', \mathbf{z}'$ 表示相對觀測量中各點在 x, y, z 方向上的坐標值。將方差-斜方差矩陣，再進行奇異值分解。

$$\mathbf{COV} = [\mathbf{s}_1 \quad \mathbf{s}_2 \quad \mathbf{s}_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [\mathbf{s}_1 \quad \mathbf{s}_2 \quad \mathbf{s}_3]^T \quad (3-10)$$

$$\mathbf{COV}' = [\mathbf{s}'_1 \quad \mathbf{s}'_2 \quad \mathbf{s}'_3] \begin{bmatrix} \lambda'_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda'_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda'_3 \end{bmatrix} [\mathbf{s}'_1 \quad \mathbf{s}'_2 \quad \mathbf{s}'_3]^T$$

其中 λ_i 及 \mathbf{s}_i ($i=1,2,3$) 為 \mathbf{COV} 之特徵值及特徵向量， λ'_i 及 \mathbf{s}'_i ($i=1,2,3$) 為 \mathbf{COV}' 之特徵值及特徵向量。由於 \mathbf{s}_i 及 \mathbf{s}'_i 為正交矩陣，故可直接視為單位向量：

$$\mathbf{v}_n = \mathbf{s}_1 \quad \mathbf{v}'_n = \mathbf{s}'_1 \quad (3-11)$$

選取特徵值中最獨特的特徵向量作為觀測資訊，可提供較強的幾何約制，才可有效發揮控制資訊的效果。以線特徵為例(見圖 3.3(a))，應選取三個向量中最大者代表該群點雲的方向向量，若是面特徵(見圖 3.3(b))則選取三個向量中最小者代表該群點雲的法向量。其餘的非主要特徵向量也可使用，但其幾何約制較弱可能會造成變形。

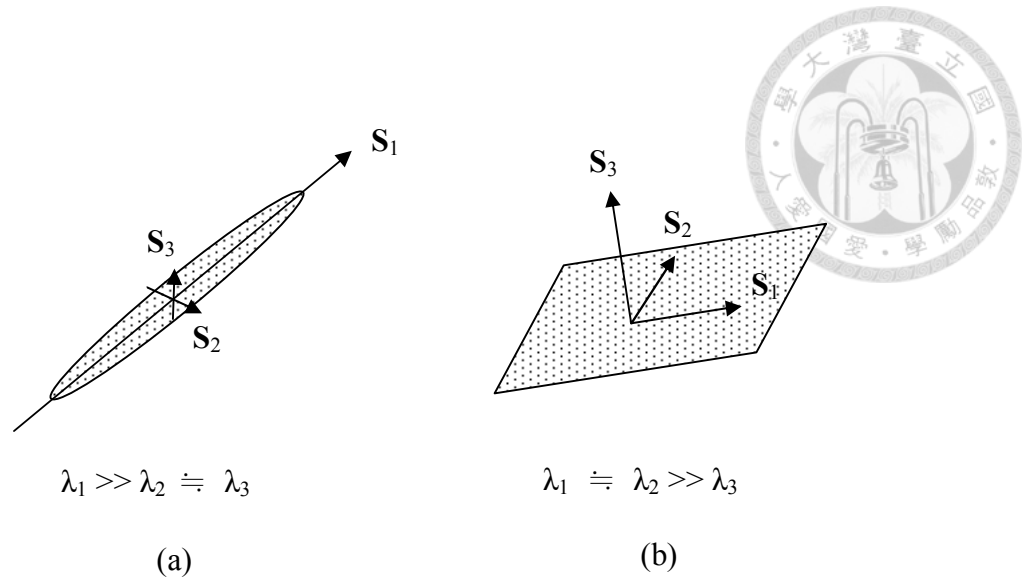


圖 3.3 線狀分布點雲及面狀分布點雲之主要向量。(a)線狀分布點雲的主要向量
(b)面狀分布點雲的主要向量

藉由堆疊(3-4)、(3-6)、(3-8)及(3-11)式中的單位向量形成 \mathbf{K} 及 \mathbf{K}' 矩陣：

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{n,1}^T \\ \mathbf{v}_{n,2}^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{n,k}^T \end{bmatrix} \quad \mathbf{K}' = \begin{bmatrix} \mathbf{v}'_{n,1}^T \\ \mathbf{v}'_{n,2}^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}'_{n,k}^T \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

當矩陣中含有三個以上($k \geq 3$)的非共面單位向量時可以(3-2)以及(3-3)式解算旋轉矩陣。

由已解算得到的旋轉矩陣可求得平移矩陣 $\hat{\mathbf{t}}'$ ：

$$\hat{\mathbf{t}}' = \boldsymbol{\mu}' - \hat{\mathbf{R}}\boldsymbol{\mu} \quad (3-13)$$

其中 $\boldsymbol{\mu}$ 及 $\boldsymbol{\mu}'$ 為各群點雲的平均值及其共軛點雲的平均值。

3.2 隧道二維變形分析模型

現行隧道監測以斷面變形監測為主，故隧道二維變形分析模型以建立斷面模型的方式進行變形分析比對，主要程序為光達資料預處理、隧道斷面範圍擷取、隧道斷面模型建立、隧道斷面變形訊號比對。



3.2.1 光達資料預處理

蒐集由光達獲取的現地資料，其原始數據為各掃描點的三維坐標。由於數據的品質及相關的資訊會直接影響最終的分析成果，因此需要先確認點雲的掃描時間、使用的儀器精度、點雲精度是否與儀器精度符合、掃描結果是否涵蓋目標區域。

確定數據可使用後再確認不同時期的點雲是否立於相同基準。由於原始光達點雲是建立在以儀器為原點的坐標系中，不同時期的數據可視為來自不同測站，可能因坐標系不同而無法重合，亦可能發生點雲不正確重合的情況。因此不同坐標系中的點雲應先整合至相同坐標系中才能進行後續的分析。

一般而言，隧道內的里程數係沿著行車方向設立，因此將隧道內的行車方向定為 y 軸時，描述斷面位置之里程數可直接等同於指定斷面的 y 坐標，則垂直行車方向且平行地面的方向為 x 軸，垂直地面的方向為 z 軸。然而原始點雲的隧道軸向不一定會與 y 軸平行，因此為了降低後續處理分析的負擔，先將隧道行車方向旋轉至與 y 軸平行(見圖 3.4)。首先選取隧道兩端各一群特徵點雲，並分別計算兩群點雲的平均坐標 g_1 、 g_2 ，則 g_1 、 g_2 可形成一方向向量，由此(3-14)式及(3-15)式可以計算出與 y 軸間的水平角 α 及垂直角 β ，

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right) \quad (3-14)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{z_2 - z_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \right) \quad (3-15)$$

再藉由坐標轉換公式(3-16)式及(3-17)式即可將隧道行車方向旋轉至與 y 軸平行。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_z R_x \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\beta) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & \sin(\beta) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

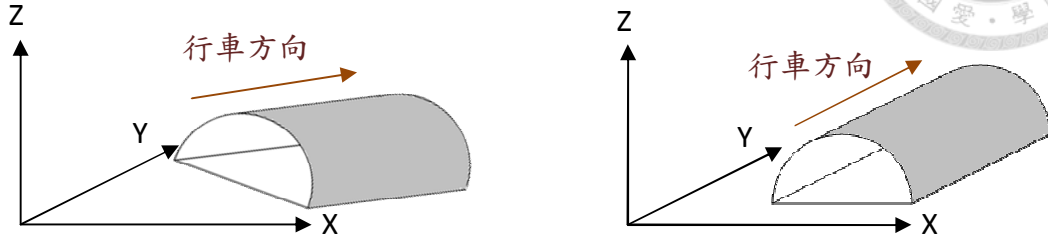


圖 3.4 光達點雲車行(里程)方向改正，褐色箭頭為車行方向 (a)原始隧道方向 (b) 行車方向與 y 軸平行

3.2.2 隧道斷面範圍擷取

由於光達獲取的是全斷面的點雲，因此可以任意選取可能已經發生變形或是有潛在變形危險的斷面。但由於點雲為隨機分布，因此選定的斷面上不一定會有點雲，故須設立一後選範圍 Δy 以得到範圍內的所有點雲，再利用這些點雲計算選定的斷面(見圖 3.5)。

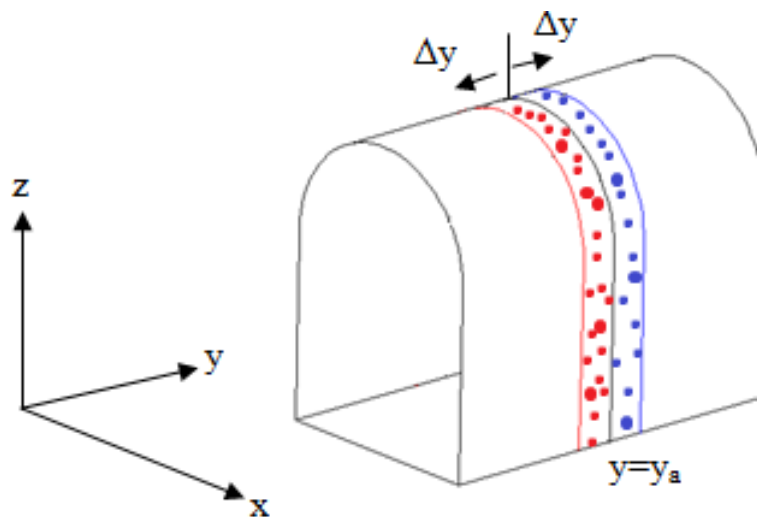


圖 3.5 斷面範圍擷取示意圖。選取斷面 y_a ，紅線及藍線表示 $y_a \pm \Delta y$ 的範圍

Δy 應為點雲精度及解析度中較大者，以避免不均勻選取點雲。假設欲分析 y 為 1m 的斷面，點雲精度為 2mm，解析度為 1cm，因為受到精度及解析度的影響，原本會落在 y 為 1m 斷面上的掃描點可能偏移至 1.01m 或 0.99m 處，因此為了儘可能精確得到欲分析的斷面，需設定一後選範圍 Δy ，且 Δy 應選擇點雲精度及解析度中較大者。

3.2.3 隧道斷面模型建立

現行隧道監測為斷面變形監測，即以斷面為單位分析整個斷面於不同時期是否有幾何上的變化，因此需建立斷面模型以利後續的分析比對。而此階段將建立原始斷面模型及完整斷面模型，前者為後續變形分析之用，後者為展示之用。

原始斷面模型

由前述步驟可得到一長度為 $2\Delta y$ 的隧道區塊，將此範圍內的點雲壓縮至 y_a 的斷面上即可得到位於 $x-z$ 平面的二維斷面模型。由斷面範圍擷取而得的點雲可分為範圍 y_a 至 $y_a+\Delta y$ 及範圍 $y_a-\Delta y$ 至 y_a 兩群點雲，找出其中一群點雲中每個點 (x_i, y_i, z_i) 與另一群點雲中最短距離的對應點 (x_j, y_j, z_j) 。由於兩點間距離相較於整個斷面模型而言甚短，因此如圖 3.7 所示，可形成兩個相似三角形，透過邊長之比即可得到兩點壓縮至 y_a 斷面上的點，壓縮至斷面上的點稱為斷面點，其 x 坐標公式如(3-18)式所示

$$\frac{x_i - x}{x_j - x} = \frac{y_i - y_a}{y_j - y_a} \Rightarrow x = \frac{x_i(y_j - y_a) - x_i(y_i - y_a)}{y_j - y_i} \quad (3-18)$$

同理可證，由(3-19)式可得斷面點的 z 坐標

$$z = \frac{z_i(y_j - y_a) - z_i(y_i - y_a)}{y_j - y_i} \quad (3-19)$$

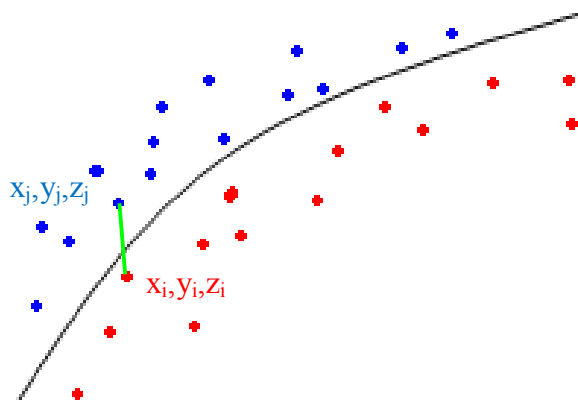


圖 3.6 隧道點雲斷面局部示意圖。黑線顯示斷面位置，紅色點雲群及藍色點雲群分別代表位於斷面兩側之點雲，綠色線顯示兩點互為最短距離之對應點

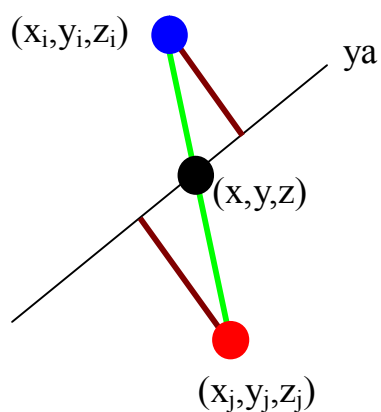


圖 3.7 斷面點之示意圖

將斷面範圍內的所有點均壓縮至 ya 斷面上後即可得到原始斷面模型，如圖 3.8 所示。

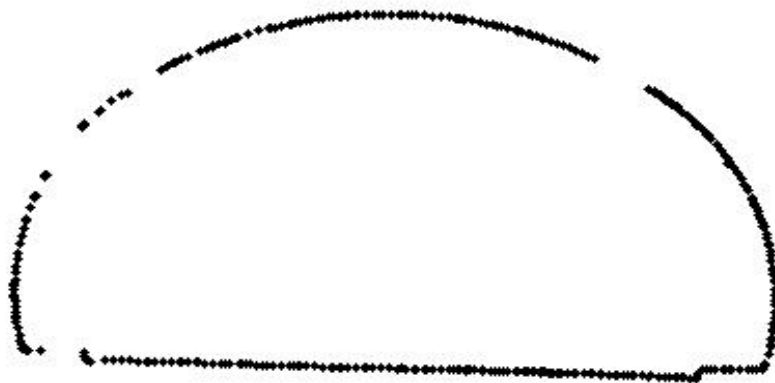


圖 3.8 擷取出之原始斷面模型



完整斷面模型

由原始點雲所產生的二維斷面模型(見圖 3.8)，可看出掃描時若有遮蔽物則會造成隧道本體有部份位置無點雲資料，而為了在視覺呈現上更加美觀，可以建立一完整的斷面模型作為展示之用。

首先計算每個點的極坐標，以(3-20)式計算每個點與原點的距離，以(3-21)式計算每個點與 x 軸間的夾角，如圖 3.9 所示。

$$d = \sqrt{x^2 + z^2} \quad (3-20)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}} \right) \quad (3-21)$$

依序計算相鄰兩點之夾角 $|\theta_n - \theta_{n-1}|$ 。

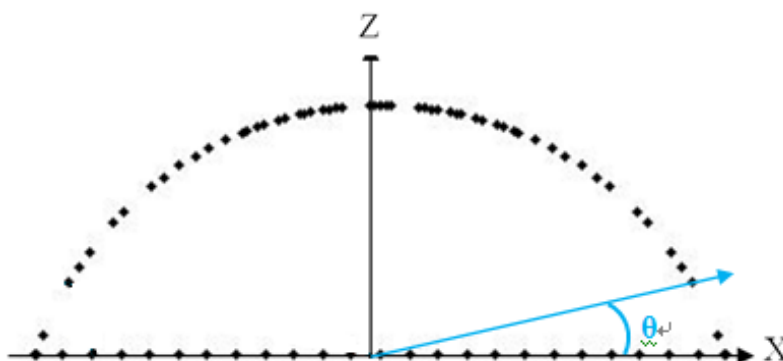


圖 3.9 點雲夾角示意圖。每個點與原點之連線與 x 軸的夾角為 θ

由斷面模型可看出隧道本體近似弧形結構，而一般的內插方式是直接將兩點以直線連線，若兩點間距離甚遠時，則內插結果會與實體有明顯誤差，故為了使內插結果更符合實際隧道本體的形狀，故以極坐標內插得到補點。首先設定一角度門檻值 ε ，當鄰近兩點間之角度大於 ε 時須進行內插得到補點，再重新計算兩點分別與內插點間的角度差值是否小於 ε ，直到整個斷面模型上各兩個相鄰點間的角度差值小於 ε 為止。

首先知點 1 及點 2 個別與原點間的距離 d_1 及 d_2 ，再以(3-22)式線性內插得到



內插點 a 的距離 d_a ，

$$d_a = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3-22)$$

其次於 θ_1 及 θ_2 間以(3-23)式線性內插角度得到 θ_a

$$\theta_a = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (3-23)$$

再利用(3-24)式計算出點 a 的坐標 (x_a, y_a)

$$\begin{aligned} x_a &= d_a \cos \theta_a \\ y_a &= d_a \sin \theta_a \end{aligned} \quad (3-24)$$

判斷點 1 與點 a 及點 2 與點 a 之夾角是否小於 ε ，若不符合則繼續內插直到小於 ε 為止。完成內插後將所有的點連接成一完整的斷面模型，如圖 3.10 所示。

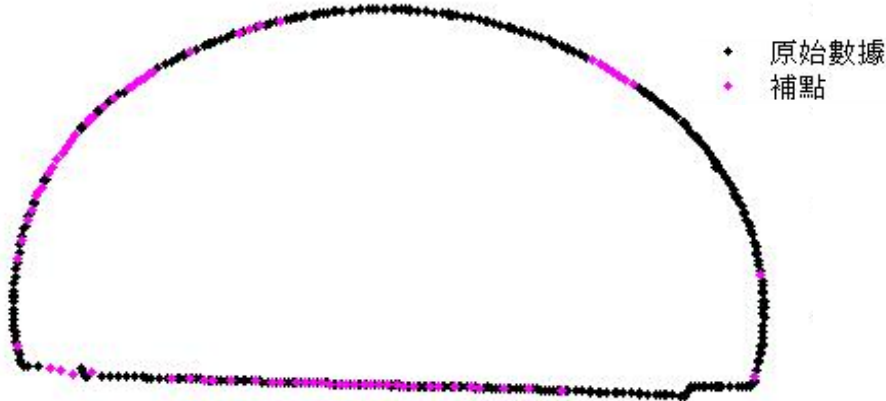


圖 3.10 經過內插補點後之完整斷面模型

完整斷面模型之目的是為了便於展示隧道整體形態，因遮蔽效應造成資料缺失的部分，僅是以內插方式產生補點，故其誤差量較大，不適用於後續的變形分析。

3.2.4 隧道斷面變形訊號比對

由前述步驟可得到同一斷面的兩個不同時期的原始斷面模型，藉由計算斷面上各點的軸向變形即可評估此斷面的變形情況。

進行比對前須先決定作為基準的基準斷面模型，另一期模型則為比對期模型，變形比對即是比對期相對於基準期各點的變化。由於變形比對會於基準期作內插，



此部份後續會詳加說明，因此基準斷面模型的選擇必須儘可能的減少比對時所產生的誤差，故應選擇兩期原始斷面模型中點雲密度較高者作為基準。

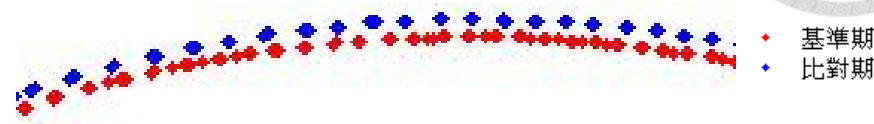


圖 3.11 不同時期原始模型之部分擷取。藍色為比對期，紅色為基準期斷面模型

斷面模型比對是以最小距離投影法(Minimum-Distance Projection Algorithm, MDP)偵測變形訊號，藉由比對期各點與基準期之各對應點的軸向距離差異作為變形量。首先決定比對期之斷面模型上可能發生變形的點，亦即實際的光達點位置 K' 。而 K' 點與基準點間的連線應會通過基準斷面模型，若是於基準斷面模型上有相對應的光達點坐標即可直接計算兩者各別與基準點間的距離長度的差異即知此點的變形情況(見圖 3.12)。

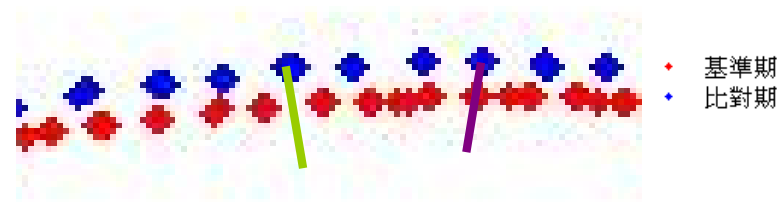


圖 3.12 不同時期原始模型之比對。紫線表示比對期的光達點、基準期的對應光達點與原點共線；綠線表示比對期的光達點在基準期中無對應光達點

若是於基準斷面模型上無相對應的光達點，則需進行內插得到基準斷面模型上相對應的位置(見圖 3.12)。比對期上任一點 K' ，可於基準期上尋找位於連線兩側各一最近點 K_1 及 K_2 ，由 K_1 及 K_2 可形成向量 $\bar{\mathbf{b}}$ ， K' 於 $\bar{\mathbf{b}}$ 之投影點 K 即為基準期上之對應點(見圖 3.13)。

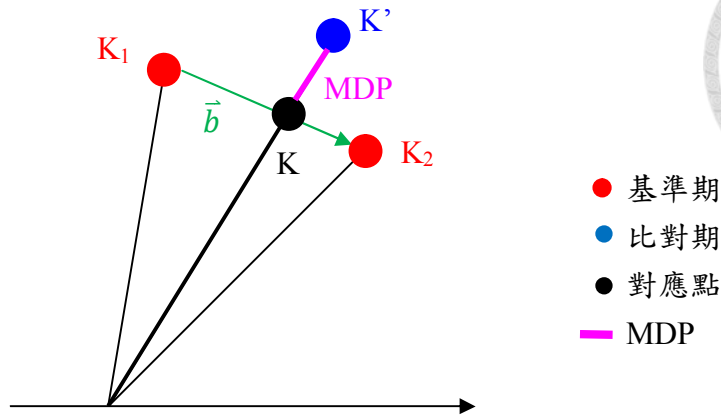


圖 3.13 基準期內插點示意圖

對應點 K 之坐標由投影公式計算，如(3-25)式

$$\begin{aligned}
 x_k &= x_{k_1} + \frac{(x_{k'} - x_{k_1})(x_{k_2} - x_{k_1}) + (z_{k'} - z_{k_1})(z_{k_2} - z_{k_1})}{(x_{k_2} - x_{k_1})^2 + (z_{k_2} - z_{k_1})^2} (x_{k_2} - x_{k_1}) \\
 z_k &= z_{k_1} + \frac{(x_{k'} - x_{k_1})(x_{k_2} - x_{k_1}) + (z_{k'} - z_{k_1})(z_{k_2} - z_{k_1})}{(x_{k_2} - x_{k_1})^2 + (z_{k_2} - z_{k_1})^2} (z_{k_2} - z_{k_1})
 \end{aligned}
 \tag{3-25}$$

最後計算 K' 及 K 間的距離即為變形訊號量 MDP_{2D} 。

$$MDP_{2D} = |k - k'| = \sqrt{(x_{k'} - x_k)^2 + (y_{k'} - y_k)^2 + (z_{k'} - z_k)^2}
 \tag{3-26}$$

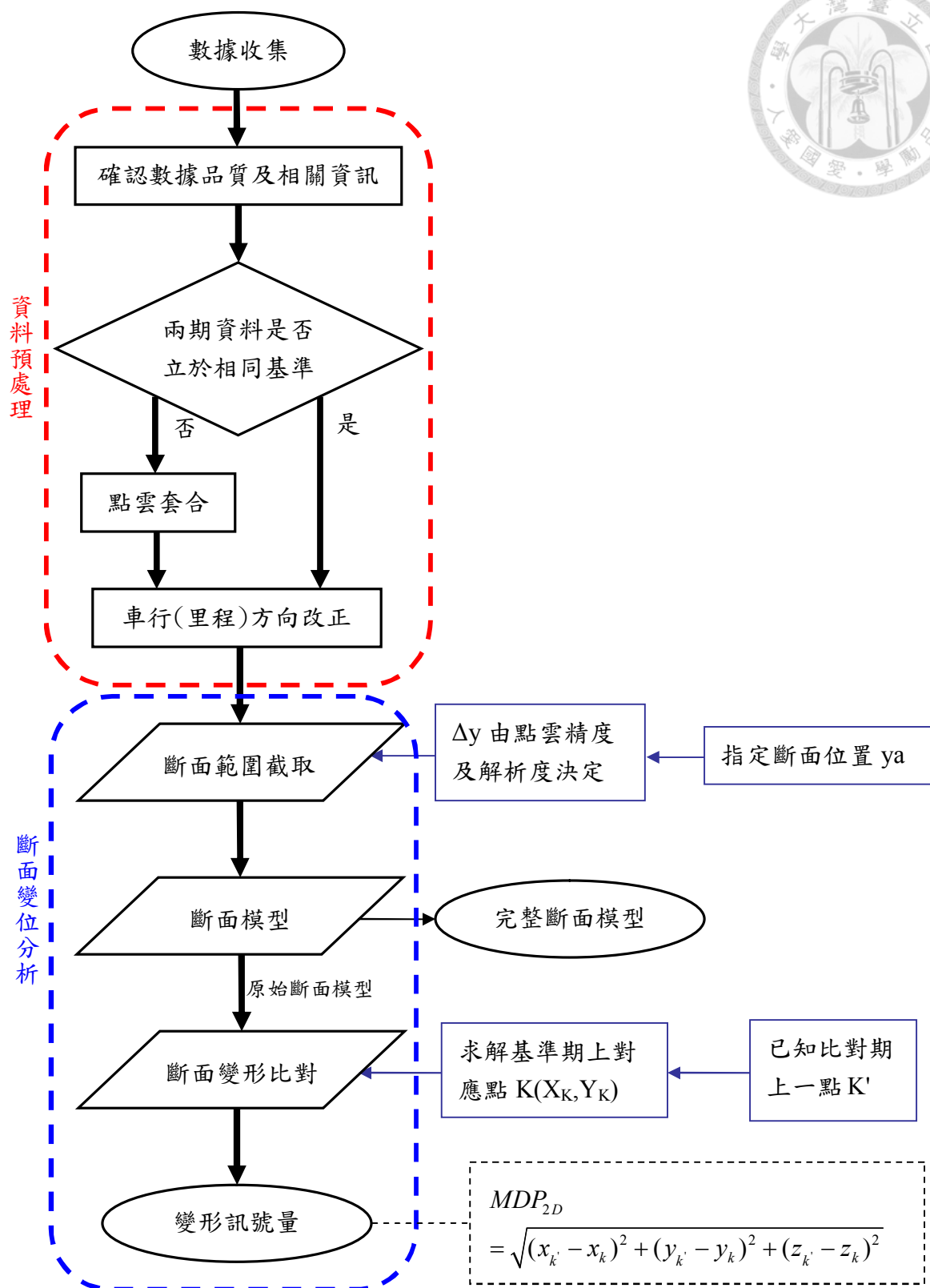


圖 3.14 二維模型分析方法流程



3.3 隧道三維變形分析模型

二維模型是自原始點雲的三維坐標壓縮至二維坐標中進行分析，由於經過一次壓縮的計算，故可能因此喪失部分變形訊號，而無法被偵測。因此再進一步推演至三維模型的分析以期得到更完整的變形訊號，增加監測的準確度。

3.3.1 光達資料預處理

根據光達點雲的資料特性可知，不同時期的測量或測站位置不同都會使光達點雲建立於不同的區域坐標系中，因此不論是二維模型分析或三維模型分析，原始光達資料都需先經過預處理，方可進行進一步的分析作業。由於三維變形分析使用的點雲資料與二維變形分析相同，兩者最大差異為前者不需將預處理後的點雲資料壓縮至二維坐標，後者則需建立二維坐標模型，故預處理程序完全相同，可參考 3.2.1 的預處理程序。

3.3.2 三維變形訊號比對

三維模型分析是基於面對面的分析，因此需要先偵測出有變形訊號的區域，再進一步計算變形訊號量。由於光達點雲隨機分布的特性，不同時期所獲得的點雲資料無法完全重合，無法直接尋找對應點進行變形訊號分析，因此藉由最小距離法(MDP)偵測變形訊號。

比對期上任一點 k' 已知其三維坐標，計算基準期各點與 k' 之距離，並找出距離最短的三個點 k_1 、 k_2 及 k_3 。因空間中三點可形成一平面， k' 點於平面之投影點即為對應點 k (見圖 3.15)，計算方式如(3-27)式所示。

$$\begin{aligned}
x_k &= x_{k'} - \frac{a*(ax_{k'} + by_{k'} + cz_{k'} + d)}{a^2 + b^2 + c^2} \\
y_k &= y_{k'} - \frac{b*(ax_{k'} + by_{k'} + cz_{k'} + d)}{a^2 + b^2 + c^2} \\
z_k &= z_{k'} - \frac{c*(ax_{k'} + by_{k'} + cz_{k'} + d)}{a^2 + b^2 + c^2}
\end{aligned}
\tag{3-27}$$

知對應點 k 之坐標後即可計算出變形訊號量 MDP_{3D} ，如(3-28)式所示

$$MDP_{3D} = |k' - k| = \sqrt{(x_{k'} - x_k)^2 + (y_{k'} - y_k)^2 + (z_{k'} - z_k)^2}
\tag{3-28}$$

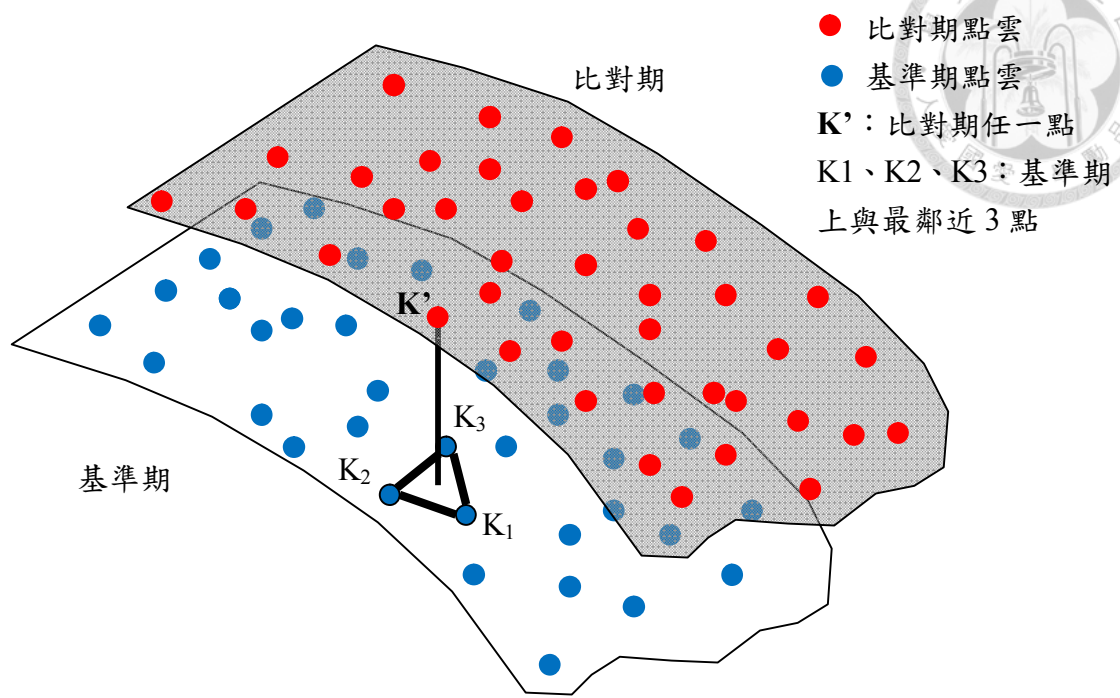


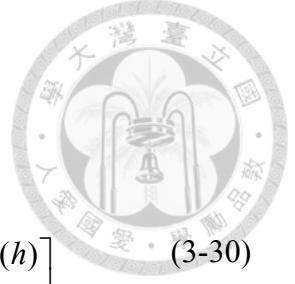
圖 3.15 隧道三維模型變形訊號比對

3.4 品質評估

依據本研究之變形分析模式所得之變形訊號，至少經過一次計算方能獲得，依據誤差傳播之原理，由光達獲得的原始資料中存在的誤差均會影響最終的分析結果，因此為了更精確的評估本研究所建立之變形分析模式所得到的變形訊號量，將於本節進行品質評估，以作為工程監測的重要參考數據。

光達原始資料是經由儀器量測距離及角度，經(2-1)式獲得各點坐標，故儀器僅提供測距精度及測角精度。由於任何測量過程均可能存在誤差，經由誤差傳播原理(Mikhail, 1981)使坐標值亦含有誤差。若光達點位坐標 $(x_{k'}, y_{k'}, z_{k'})$ ，測距精度及測角精度分別為 σ_ρ 、 σ_v 、 σ_h ，則由(3-29)式可推得各坐標值精度。

$$\Sigma_{\bar{x}_k} = \mathbf{J}_x \begin{bmatrix} \sigma_\rho^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h^2 \end{bmatrix} \mathbf{J}_x^T \quad (3-29)$$



(3-29)式中的對角元素 \mathbf{J}_x 由(3-30)式表示之

$$\mathbf{J}_x = \frac{\partial \{x_{k'}, y_{k'}, z_{k'}\}}{\partial \{\rho, v, h\}} = \begin{bmatrix} \cos(v) \cos(h) & -\rho \sin(v) \cos(h) & -\rho \cos(v) \sin(h) \\ \cos(v) \sin(h) & -\rho \sin(v) \sin(h) & \rho \cos(v) \cos(h) \\ \sin(v) & \rho \cos(v) & 0 \end{bmatrix} \quad (3-30)$$

隧道二維變形分析模型

隧道二維變形分析模型中變形訊號量 MDP_{2D} 的計算公式如(3-26)式所示，依據誤差傳播原理，可由原始點雲的精度誤差計算出變形訊號量的誤差，如(3-31)式所示

$$\sigma_{MDP_{2D}}^2 = \mathbf{J} \Sigma_{xx} \mathbf{J}^T \quad (3-31)$$

其中 \mathbf{J} 由(3-32)式表示之， Σ_{xx} 由(3-33)式表示之

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \{MDP_{2D}\}}{\partial \{\bar{x}_{k'}, \bar{x}_1, \bar{x}_2\}} \quad (3-32)$$

$$\Sigma_{xx} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\bar{x}_{k'}} & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma_{\bar{x}_1} & 0 \\ 0 & 0 & \Sigma_{\bar{x}_2} \end{bmatrix} \quad (3-33)$$

(3-33)式中的對角元素 $\Sigma_{\bar{x}_{k'}}$ 、 $\Sigma_{\bar{x}_1}$ 、 $\Sigma_{\bar{x}_2}$ ，可由(3-29)式計算而得。

隧道三維變形分析模型

三維變形分析模型與二維變形分析模型的品質評估計算方式相同，惟兩者最大差異係為變形比對時考慮點的三維坐標，即加入與車行方向平行的 y 坐標，故計算時需增加一個維度。三維模型的變形訊號量公式如(3-28)式所示，依據誤差傳播原理，可由原始點雲的精度誤差計算出變形訊號量的誤差，如(3-34)式所示

$$\sigma_{MDP_{3D}}^2 = \mathbf{J} \Sigma_{xx} \mathbf{J}^T \quad (3-34)$$

其中 \mathbf{J} 由(3-35)式表示之， Σ_{xx} 由(3-36)式表示之



$$\mathbf{J} = \frac{\partial \{MDP_{3D}\}}{\partial \{\bar{x}_k, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3\}} \quad (3-35)$$

$$\Sigma_{xx} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\bar{x}_k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma_{\bar{x}_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Sigma_{\bar{x}_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Sigma_{\bar{x}_3} \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

上式中各元素之計算可由(3-29)式計算而得。

任何測量結果均可能含有隨機誤差，且光達掃描時亦可能因雜訊干擾而產生隨機誤差。根據統計理論中的信賴區間的概念， $\pm\sigma$ 範圍內的變形訊號均可視為隨機誤差。為了使分析結果更具可靠度，本研究將信賴水準提高至 95%(即 $\pm 1.96\sigma$)，當變形分析結果大於 1.96σ 時方可視為變形訊號，其餘變形訊號則視為隨機誤差。

考量工程監測工作需有時效性的特性，本研究以利用現地特徵整合光達多測站資料的方式降低處理原始資料所需耗費的時間，並分別建立隧道二維變形分析模型及三維變形分析模形的完整分析流程。二維變形分析是依現行監測工作常用的內空變位分析為基礎，以斷面為單位偵測變形訊號；三維變形分析則是依最原始的資料形態，以基於面對面的分析方式偵測變形訊號。最後進行品質評估以作為監測工作的可靠度依據。



第四章 數值驗證與分析

本章以第三章所建立之隧道變形分析模型，進行數值資料之結果分析。首先以模擬實驗建立一仿真隧道，再分別針對變形分析流程中，利用現地特徵整合光達測站資料、隧道斷面模型建立及斷面變形訊號比對進行最佳化分析，進而提高被偵測之斷面變形訊號的精確度。其次，以光達實際掃描雪山隧道所獲取之點雲資料，以本研究所建立之變形分析流程進行二維變形訊號分析及三維變形訊號分析，並探討分析結果。

4.1 模擬實驗

為了驗證隧道變形分析模型的正確性，及最佳化分析流程以提高被偵測之變形訊號的精確度，將模擬實驗分成四個部分進行探討與分析。第一個部分為建立隧道模型，第二個部分為驗證 NISLT 的有效性，第三個部分為不同取樣對可偵測之變形量影響，第四部分為基準期對變形分析結果的影響。

4.1.1 隧道點雲模擬

為了模擬隧道現場實施監測後獲得的資料形態及精度，以利事前工作的規劃及精度分析，本實驗是以雪山隧道導坑作為雛型，模擬以 Optech ILRIS-3D(見圖 4.1 及表 4.1)掃描一半徑為 3 公尺，長為 20 公尺的隧道模型 T0 進行模擬實驗，見圖 4.2。

表 4.1 Optech ILRIS-3D 儀器規格



圖 4.1 Optech ILRIS-3D

型號	Optech ILRIS3
測距精度	7mm@100m
測角精度	8mm@100m
解析度	0.001146°
掃描速度	2000 點/秒

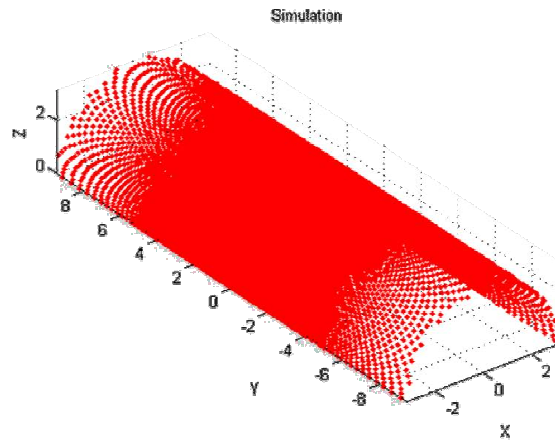


圖 4.2 隧道模型 T0(單位:公尺)

由光達獲取之點雲，各點精度會受到與測站間的距離影響(見圖 4.3)，當點雲愈接近測站，其點雲精度愈高，點雲密度也愈高，因此實際量測時應考量兩測站的間距，以避免同時距離兩測站較遠的邊界點雲密度過稀及精度過低。透過事前工作，藉由規劃各測站的位置可避免發生邊界點雲的問題，進而提高監測及後續變形分析的效益。

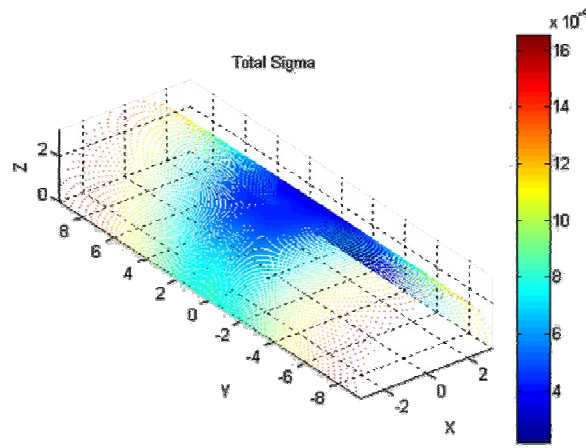


圖 4.3 隧道模型各點的精度(單位:公尺)

4.1.2 不同取樣對可偵測之變形量影響

二維模型變形分析於建立原始斷面模型時，由於光達點雲不規則取樣的特性，於特定斷面上不一定有足夠的點雲提供分析，因此需決定一候選範圍 Δy ，並將 $\pm\Delta y$ 範圍內的點雲壓縮至二維坐標中，因此候選範圍 Δy 的選取應會影響二維模型的建



立，故本實驗目的為探討不同取樣對可偵測之變形量的影響。以精度為 4mm、解析度為 10mm 之隧道模型，分別以 $\Delta y=1\sim 10$ 進行變形訊號量分析，其結果如圖 4.4 所示。

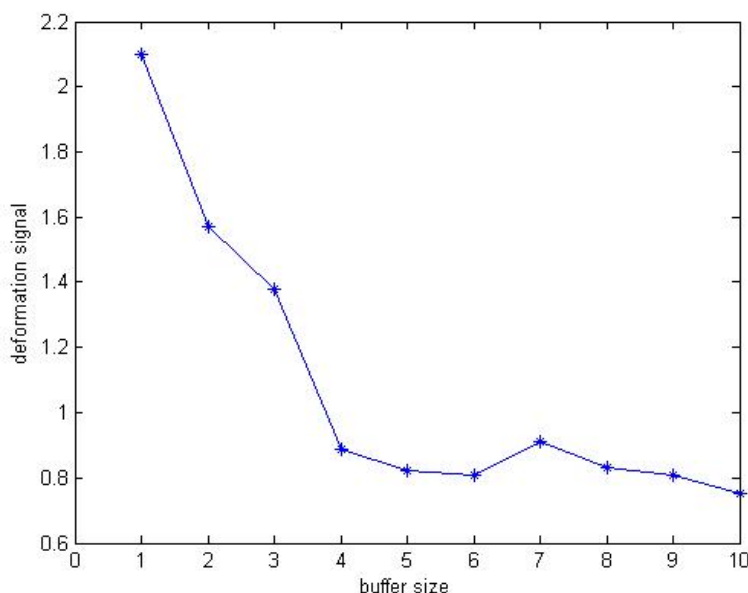


圖 4.4 不同取樣與變形假訊號量之關係(單位 mm)

當候選範圍 Δy 小於 4mm 時，變形假訊號量明顯較大，即分析結果包含較多變形假訊號量，原因為當候選範圍小於精度及解析度中較小者，候選範圍內的點雲數會過少，造成原始斷面模型過度粗糙(rough)，當程序至斷面變形比對時會因為內插產生較大的誤差，但此誤差為原始斷面模型失真造成的變形假訊號，而非真正的變形訊號；當候選範圍 Δy 介於精度及解析度之間時，變形假訊號量均小於公釐等級，且當 $\Delta y=10\text{mm}$ 時，變形假訊號量最小。故建立原始斷面模型時，應選擇精度及解析度中較大者作為候選範圍，以避免增加變形假訊號量，造成分析結果誤判。

4.1.3 基準期密度對變形分析結果的影響

由二維模型的分析流程可知，計算變形訊號量的方式係於斷面變形比對時以角度內插的方式，計算比對期 K' 點於基準期的對應點 K 的坐標，由於此過程中會

經過內插計算，因此研究者認為當兩期點雲密度不同時，以密度高或密度低者作為基準期會使分析結果有所不同，故此實驗之目的為驗證基準期密度對變形分析結果的影響。首先，隧道模型 T0 是以取樣間隔 1 度模擬而成，本實驗再模擬一尺寸及測站位置均相同，取樣間隔 5 度的隧道模型 T1。

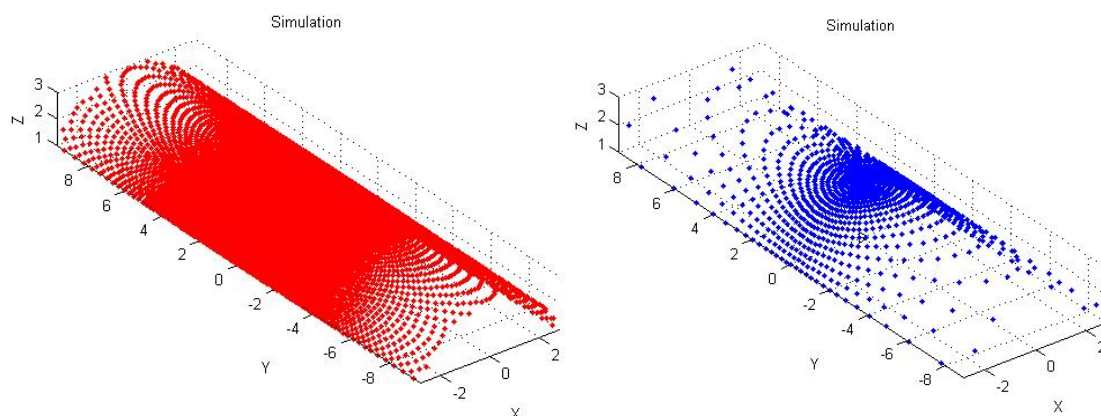
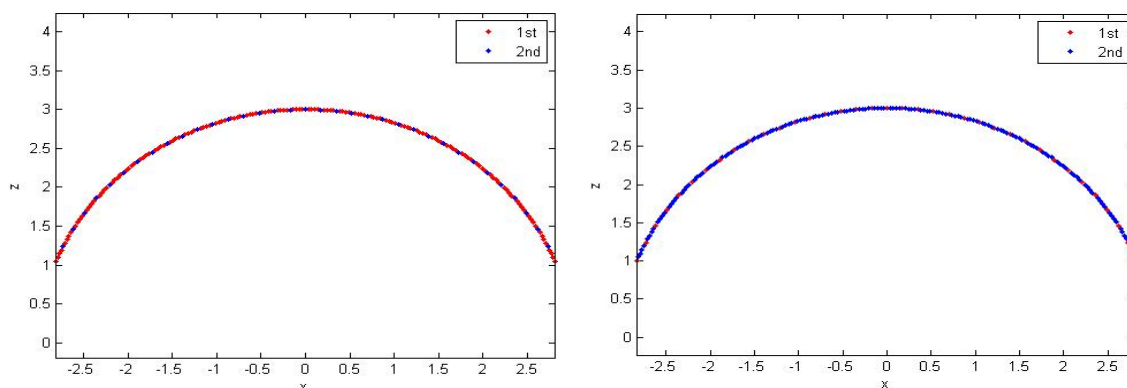


圖 4.5 取樣間隔不同的隧道模型 (a) T0 (b) T1(單位:公尺)

以二維模型變形分析建立 T0 及 T1 的二維模型 T02D 及 T12D，再分別以 T02D 及 T12D 作為基準期，另一模型作為比對期，進行斷面變形比對。由於兩期點雲的尺寸及測站位置均相同，只有取樣間隔不同且無隨機誤差，故不論以 T02D 或 T12D 作為基準期，因兩者間無變形現象，其分析結果都應為 0，但因為經過壓縮及內插，故會產生誤差。當 T02D 作為基準期時的變形假訊號明顯比以 T12D 作為基準期時小(見圖 4.6)，其中紅色為 T02D，藍色為 T12D。

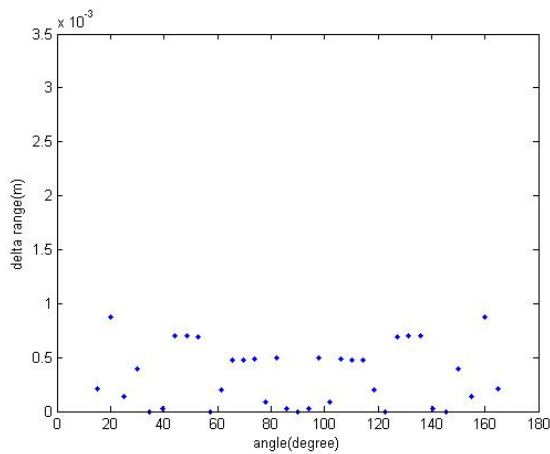


(a) 以 T02D 為基準期之二維模型

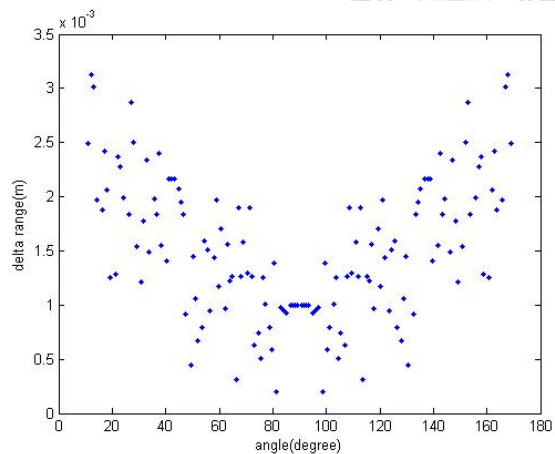
(單位:公尺)

(b) 以 T12D 為基準期之二維模型

(單位:公尺)



(c) 以 T02D 為基準期之變形訊號



(d) 以 T12D 為基準期之變形訊號

圖 4.6 以不同取樣間隔隧道建立之二維斷面模型 T02D 及 T12D 為基準期的變形量分析結果。

以測站位置為中心，兩期模型之比較如圖 4.6(a)及(b)，可看出兩模型僅點間隔距離(取樣間隔)不同。定義角度由測站一側(0°)沿隧道斷面至測站另一側(180°)，分析以不同取樣間隔隧道模型為基準期之變形量(見圖 4.6(c)及(d))，縱軸為變形量，可發現以取樣間隔較小之模型為基準期，分析而得之變形量較小。

表 4.2 不同基準期的變形量

變形量(m)	T02D 為基準期	T12D 為基準期
最大值變形量	0.00087	0.0031
最小變形量	0.00003	0.0005
平均變形量	0.0003	0.0012

由表 4.2 知結果可發現，以 T02D 為基準期之平均變形量為 0.0003m，以 T12D 為基準期之平均變形量為 0.0012m。由此可見，當基準期點雲密度較比對期點雲密度大時，經由二維模型變形分析得到的變形訊號結果較精確，故進行斷面變形比對時，為減少分析結果誤判的機會，應選取兩期點雲中，點雲密度較大者作為基準期，另一期為比對期，以避免增加變形訊號的誤差。



4.2 實例應用—雪山隧道點雲變形分析

本實驗是以實際資料驗證本研究方法之可行性及可偵測最小變形量，並以自製標準變形模擬物模擬實際變形狀況。為了增加監測工作的效率，進入隧道量測前的事前規畫是整體監測工作的重要一環，包含測站位置、原始資料精度分析等都應事先評估規劃。進入隧道量測時依事前規劃逐一進行，所獲取的原始資料分別以二維變形分析模型及三維變形分析模型偵測變形訊號量，最後再進行品質評估，以確保分析結果符合隧道監測的精度規範。

4.2.1 實驗配置及事前規劃

完整的監測工作包含監測前的準備，為了確保監測資料的品質，並使現場監測工作有較高效率，事前測站規劃是重要程序。由於本實驗是短時間內以光達重覆掃描目標區以獲取多筆實際資料，不易有較大變形現象，故研究者自製標準變形模擬物於掃描時黏貼於隧道襯砌上，模擬隧道變形現象。實驗配置如表 4.3。

表 4.3 實例應用之實驗配置

實驗時間	101.1.16, 10:00p.m.
光達型號	Z+F 5010(圖 4.7)
儀器精度	5mm@100m
掃描目標	雪隧北上 26.3K
隧道半徑	4.7m
標準標準變形模擬物尺寸	0.5cm、0.8cm、1cm



圖 4.7 Z+F 5010 (Zoller + Fröhlich GmbH, 2012)

自製標準變形模擬物是利用方型木棒對角線切割後，重新組合成等腰三角形木棒，木棒長均為 20cm，垂直高度依序為 1cm、0.8cm、0.5cm，使用時將最長邊黏貼於隧道內目標區之襯砌。黏貼高度約為離地 2m 處，木棒長平行於車行方向，以萬能噴膠黏貼，實驗結束後可移除以避免破壞襯砌。

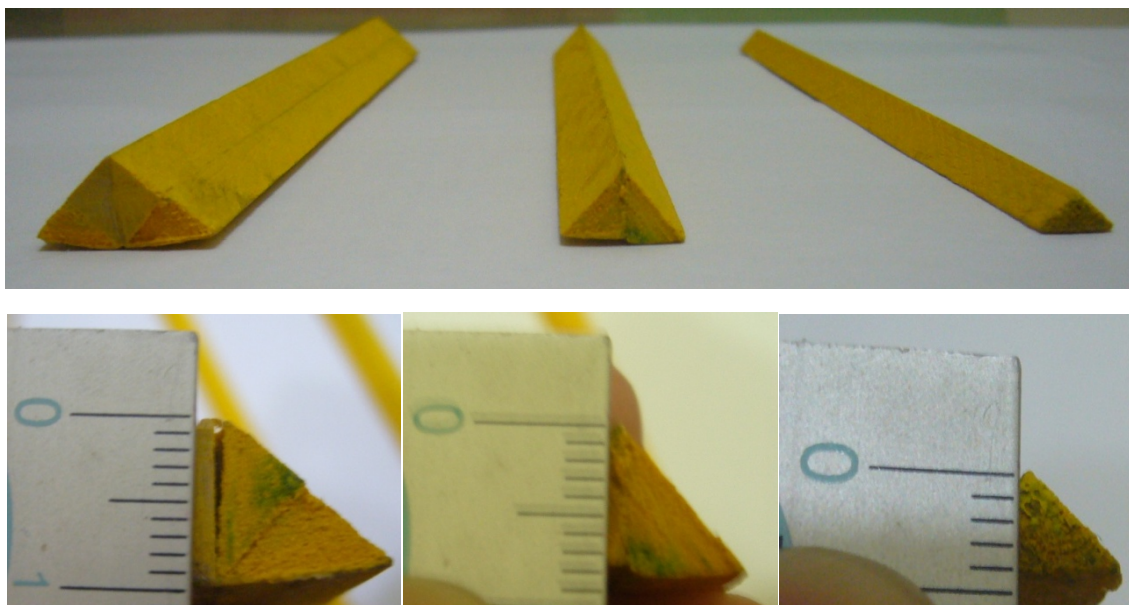


圖 4.8 標準變形模擬物

考量本次實驗目標之隧道半徑、三維雷射掃描儀之精度及解析度等，於實驗前先評估測站擺設位置與點雲精度之關係，並作為實驗前規劃之參考。圖 4.9 為實驗目標精度評估，可看出儀器架設於兩旁人行道時，與儀器相距 10m 範圍內之點雲精度均小於公釐等級，符合本實驗之精度要求。

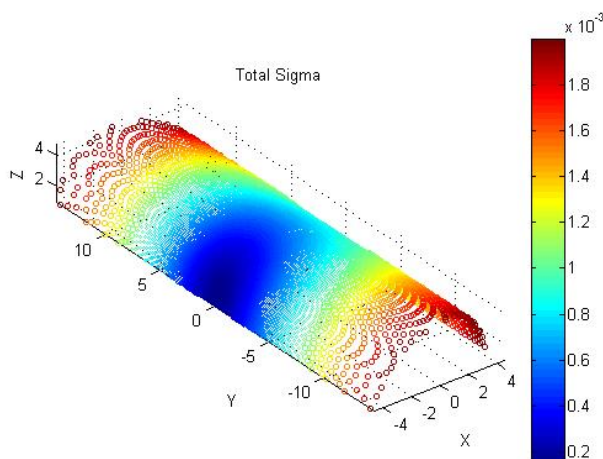


圖 4.9 實驗目標精度評估



本實驗先掃描兩次目標區，再依序放置自製的不同尺寸之標準變形模擬物，共計得到 5 筆數據，實驗流程如圖 4.10 所示。

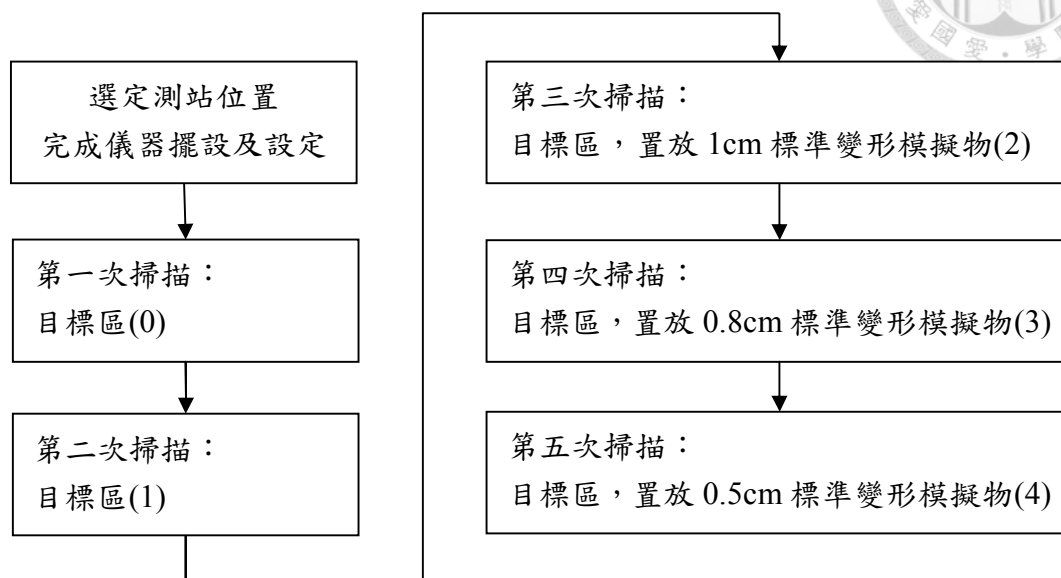


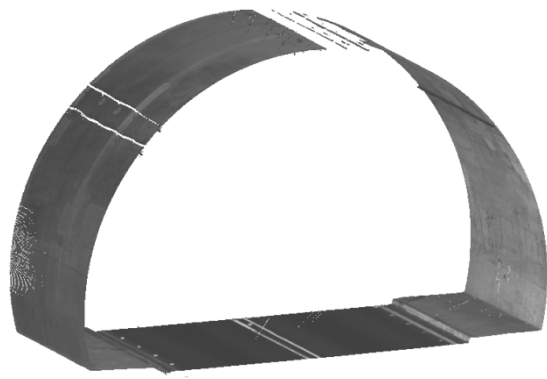
圖 4.10 實驗流程圖



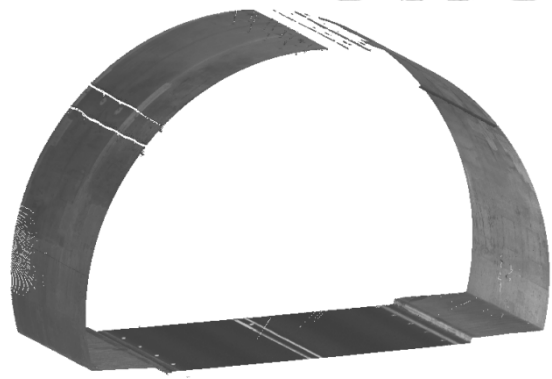
圖 4.11 實驗現場影像。(a)實驗現場 (b)標準變形模擬物

4.2.2 二維變形模型分析

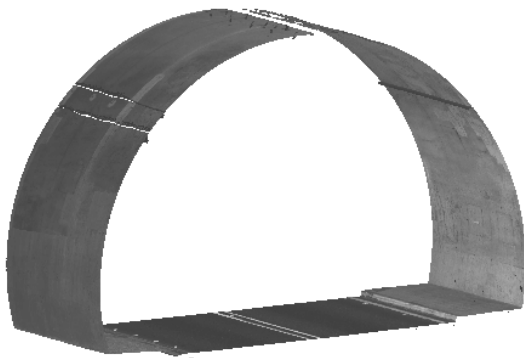
由實驗獲取的數據依序為無標準變形模擬物(0)、無標準變形模擬物(1)、1cm 標準變形模擬物(2)、0.8cm 標準變形模擬物(3)、0.5cm 標準變形模擬物(4)，原始點雲如圖 4.12 所示，標準變形模擬物位於隧道右側襯砌上。標準變形模擬物點雲展示見圖 4.13，垂直面為隧道襯砌牆面，突出部分即為標準變形模擬物。



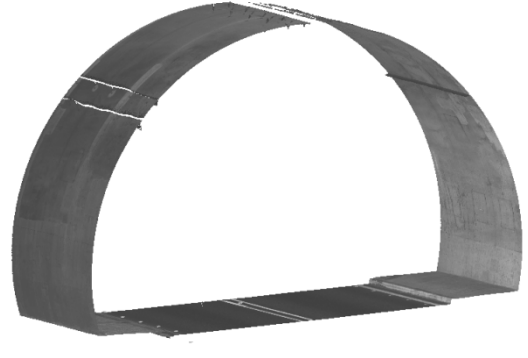
(a) 無標準變形模擬物(0)



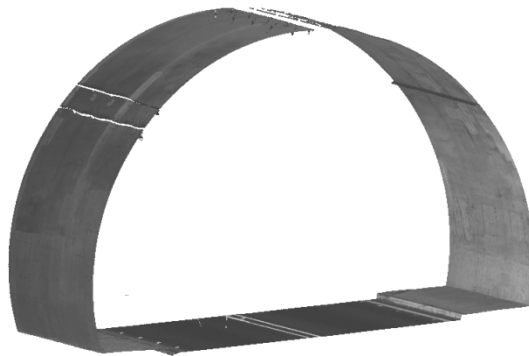
(b) 無標準變形模擬物(1)



(c) 1cm 標準變形模擬物(2)



(d) 0.8cm 標準變形模擬物(3)



(e) 0.5cm 標準變形模擬物(4)

圖 4.12 實驗掃描獲取之原始點雲

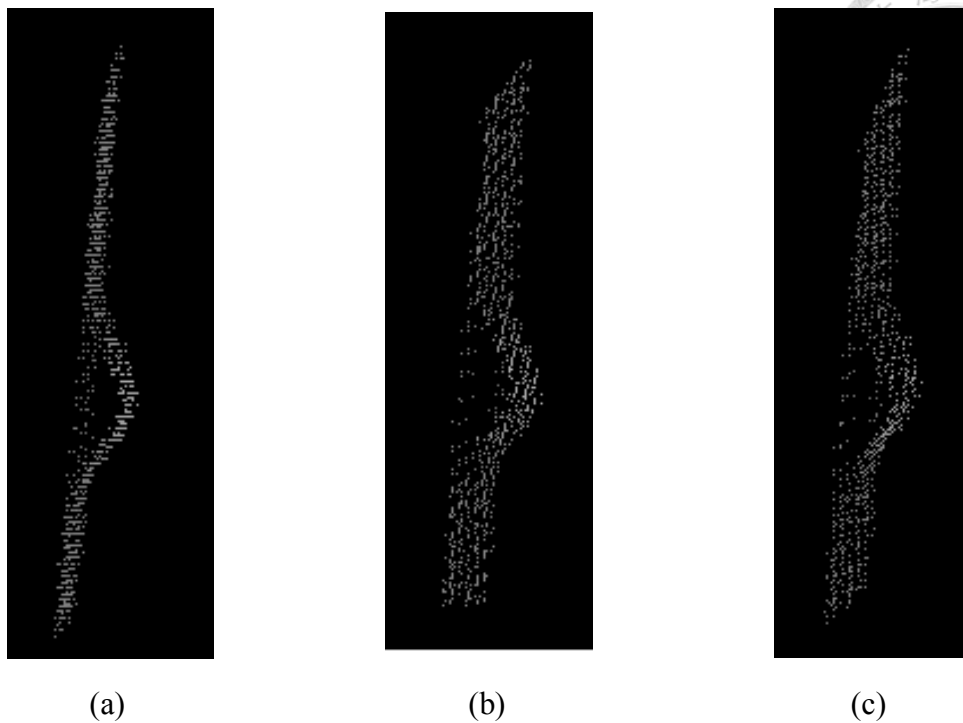
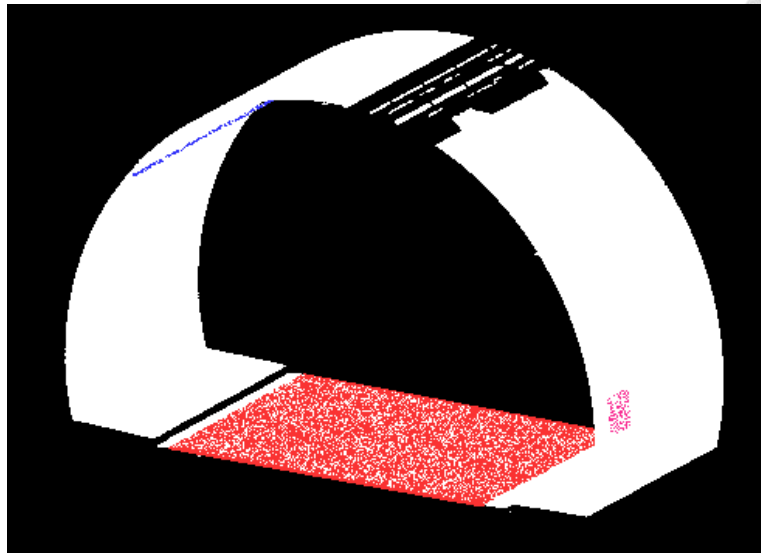
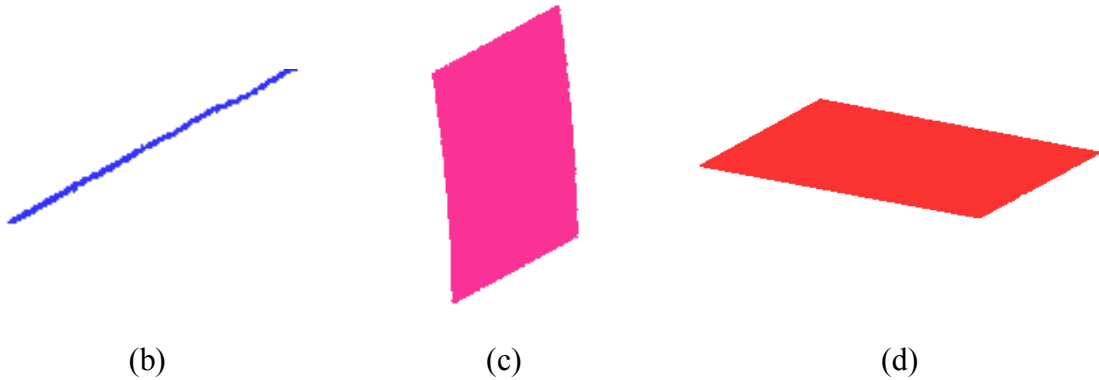


圖 4.13 隧道變形區塊之光達原始點雲(側視圖)。(a)1cm (b)0.8cm (c)0.5cm

由光達掃描獲取之點雲是建立在以儀器為中心的區域坐標系中，受到初始位置及姿態的不同，每次掃描時建立的坐標系均不同，因此須將欲進行變形比對的不同期點雲整合至相同坐標系中，方能進行後續的變形分析流程。本研究是利用現地特徵整合不同點雲，此法需有三個以上(含)的不同現地特徵進行計算，因此於隧道點雲中選取三個最明顯的現地特徵(見圖 4.14)，分別為管線架(線狀特徵)、襯砌面(面狀特徵)、車道面(面狀特徵)。由於本實驗是以無標準變形模擬物(0)的點雲作為基準期，即是將所有不同期點雲都整合至(0)的坐標系中，又因本次實驗的掃描目標區完全相同，因此各期點雲均可以相同的三個現地特徵作為整合點雲的現地特徵。然而，不同期點雲分別屬於不同掃描區段時，選取現地特徵時須確保其特徵同時存在兩期點雲中，即選取之現地特徵需為共軛現地特徵。



(a)



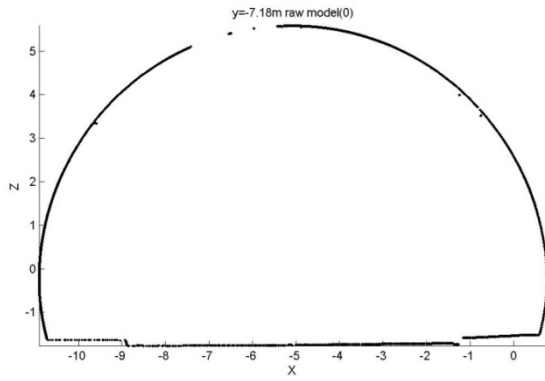
(b)

(c)

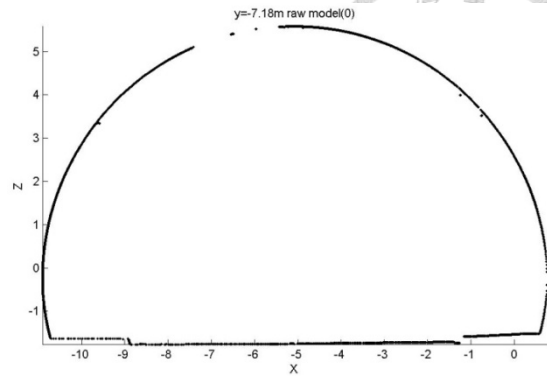
(d)

圖 4.14 NISLT 所需特徵及其位置。(a)各特徵於隧道中的位置 (b)特徵 1 (c)特徵 2
(d)特徵 3

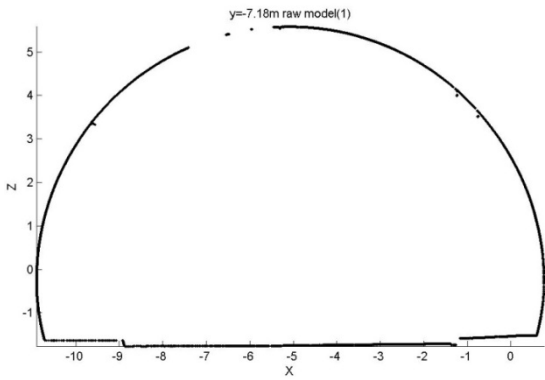
將整合至(0)坐標系中的不同期點雲，選擇 $y=-7.1\text{m}$ 之斷面進行變形分析，由於此斷面之精度為 4mm ，解析度為 10mm ，故候選範圍 Δy 設定為 10mm ，並以二維模型變形分析方法之程序建立原始斷面模型(見圖 4.15)。



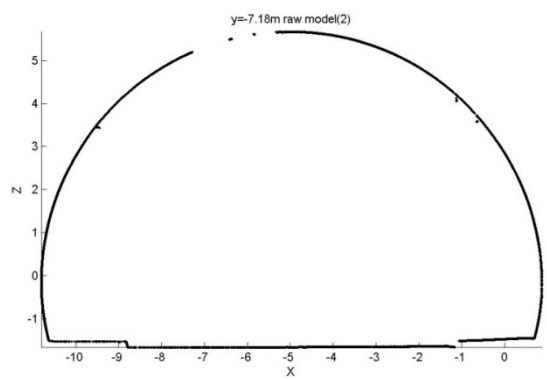
(a) 無標準變形模擬物(0)



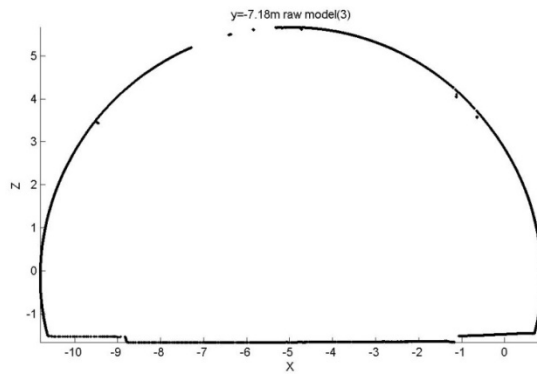
(b) 無標準變形模擬物(1)



(c) 1cm 標準變形模擬物(2)



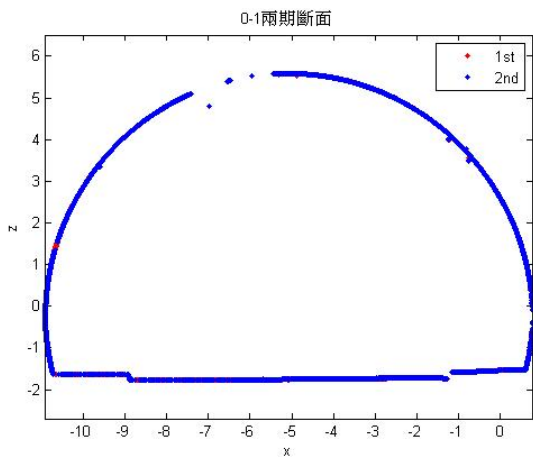
(d) 0.8cm 標準變形模擬物(3)



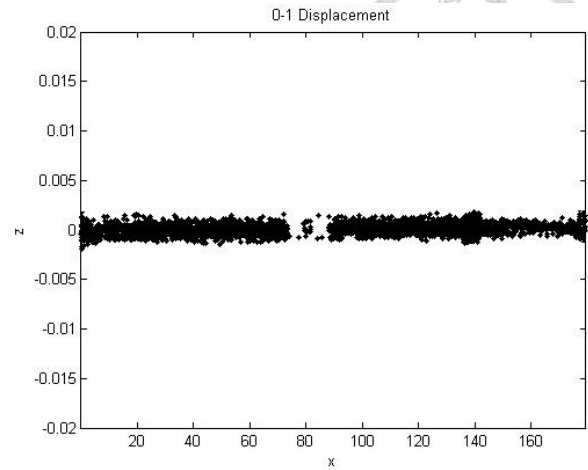
(e) 0.5cm 標準變形模擬物(4)

圖 4.15 不同時刻掃描結果之原始斷面模型

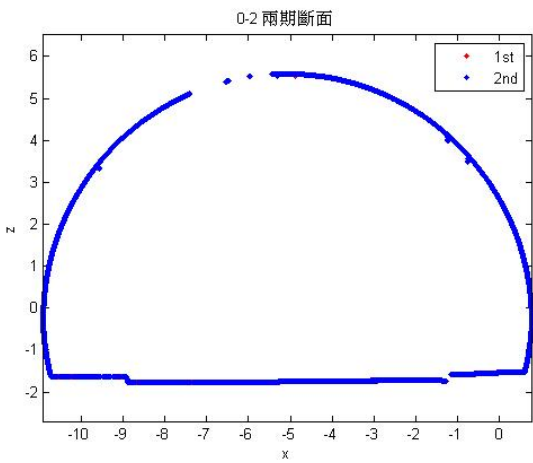
由於本次實驗並無改變掃描時的點雲密度，因此 5 筆數據之點雲密度均相同，為了便於分析比較，以(0)作為基準期，(1)~(4)之掃描結果作為比對期，分別進行(0)-(1)、(0)-(2)、(0)-(3)、(0)-(4)等四組變形量分析。



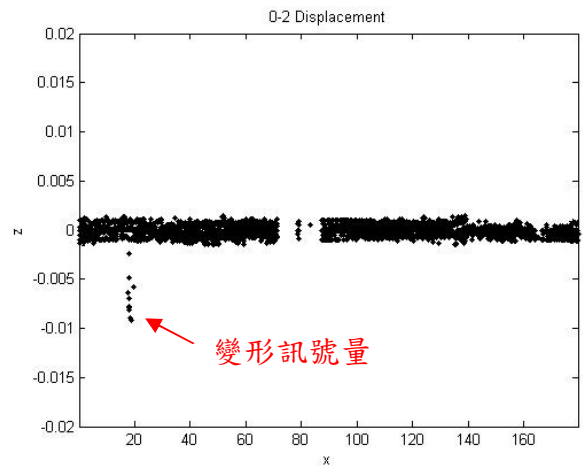
(a)



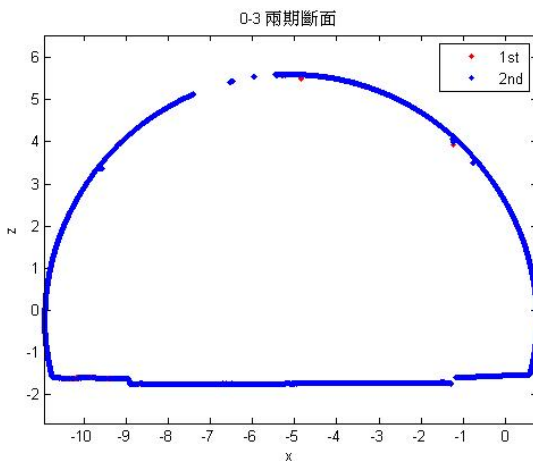
(e)



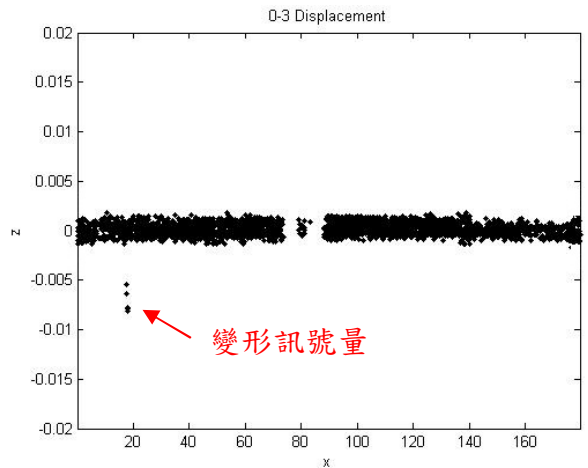
(b)



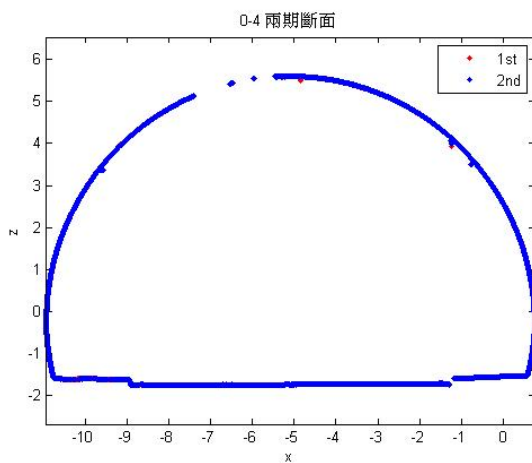
(f)



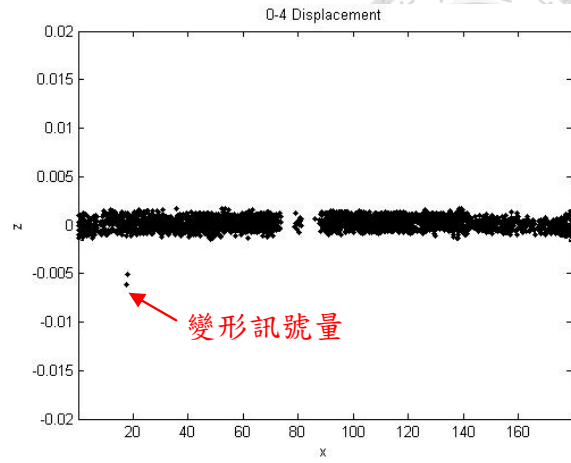
(c)



(g)



(d)




(h)

圖 4.16 原始断面模型及變形訊號量。(a)~(d)為各組基期與比對期之原始模型；
(e)~(h)為各組變形量

如圖 4.16 所示，(a)~(d)中紅色部分為基準期之原始断面模型，藍色部分均為比對期之原始断面模型；(e)~(h)為各組變形量，由(e)之結果發現無標準變形模擬物時仍偵測到微小變異量，故將之視為誤差及雜訊，(f)~(h)則可發現由標準變形模擬物所造成的變形訊號均可被完整偵測。進一步探討無點位資訊的部分是因為掃描時受到現地遮蔽物的影響而造成的資料缺失，與圖 4.14 無點雲部分一致。

表 4.4 二維變形模型變形訊號量

變形量(m)	(0)-(1)	(0)-(2)	(0)-(3)	(0)-(4)
實際變形量	0	1	0.8	0.5
最大變形量	0.0009	0.0092	0.0081	0.0061
最小變形量	6.8e-8	6.8e-8	6.8e-8	6.8e-8
平均變形量	1.4e-4	-8e-4	-1.6e-4	-1.5e-4
RMSE	7.3e-4	8.8e-4	8.5e-4	7.7e-4
σ	0.00082	0.00076	0.00077	0.00082



由於本次實驗之 5 筆數據是在一小時內掃描完成，故理論上除了標準變形模擬物所造成的變形訊號外，其餘部分之變形量應為 0，但(0)-(1)的結果發現即使無放置標準變形模擬物，仍可偵測到變形訊號。根據統計理論中的信賴區間的概念，分析結果大於 1.96σ 時方可視為變形訊號，其餘變形訊號則視為隨機誤差，由表 4.4 可知(0)-(1)分析結果獲得之最大變形量小於 1.96σ ，故可視為無變形訊號，亦即無變形現象發生。而(0)-(2)、(0)-(3)、(0)-(4)的最大變形量均遠大於 1.96σ ，故視為變形訊號量，且偵測到的變形量與各標準變形模擬物的尺寸非常接近，顯示本研究方法的確可偵測到微小變形量，並符合隧道安全等級中，需立即採取補救措施之丙級(3mm)的需求。

4.2.3 三維變形模型分析

前述實驗已驗證二維模型變形分析之可行性，但由於其程序中經過二次內插計算，故仍可能產生變形假訊號，進而增加變形分析結果的誤差，因此為了減少此誤差產生機會而發展出三維模型變形分析。本實驗即以二維模型變形分析之原始資料進行三維變形分析，以驗證其可行性。點雲資料的預處理程序與二維變形分析相同，需先確認點雲資料品質，並以現地特徵將不同期點雲整合至相同坐標系中。

將整合至(0)坐標系中之第 2 筆數據(1)作為比對期，找出基準期中與各點距離最短的 3 個點後，分別以(3-26)式、(3-27)式、(3-28)式計算於基準期的對應點，再以(3-29)式計算兩點間之距離即為變形訊號量。第 3 筆(2)至第 5 筆(4)資料均依同樣步驟計算獲取各點之變形訊號量。將變形訊號量以顏色表示可發現變形物的明確區域，亦可知其發生最大變形的位址(見圖 4.17)。

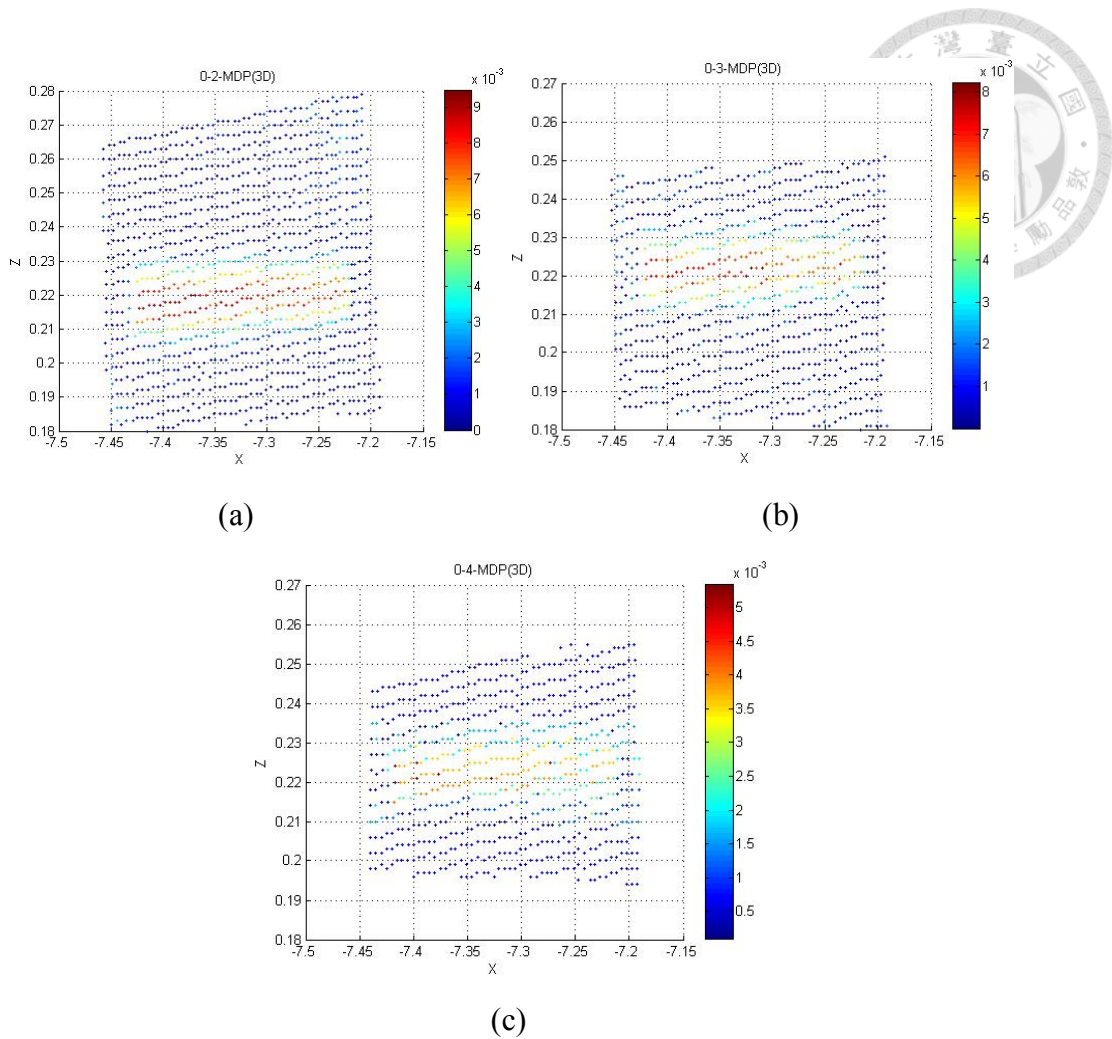



圖 4.17 三維變形模型變形訊號量 (a) (0)-(2)比對結果(b) (0)-(3)比對結果(c) (0)-(4) 比對結果(單位:公尺)

表 4.5 三維變形模型變形訊號量


變形量(m)	(0)-(1)	(0)-(2)	(0)-(3)	(0)-(4)
實際變形量	0	1	0.8	0.5
最大變形量	0.0008	0.0093	0.0081	0.0054
最小變形量	4.5e-8	7.9e-8	8.3e-8	6.8e-8
平均變形量	1.4e-4	-6.8e-4	-3.7e-4	-1.1e-4
σ	0.00075	0.00063	0.00063	0.00074



三維變形模型變形訊號量的分析結果(見表 4.5)顯示(0)-(1)之分析結果均小於 1.96σ ，故其結果均視為隨機誤差，亦即無變形訊號，此結果與二維變形分析結果相同。(0)-(2)及(0)-(3)之分析結果與二維變形分析結果相似，可偵測之最大變形量與實際變形量一致。(0)-(4)之分析結果較二維模型變形分析結果佳，可偵測之最大變形量更接近實際變形量。然而，比較三維變形分析及二維變形分析結果發現，各組三維變形分析結果的標準差 σ 較小，即隨機誤差較小，顯示三維變形分析結果可偵測之最小變形訊號量較小。

透過本章之模擬實驗及實例應用，驗證本研究建立之二維變形分析模型及三維變形分析模型均可有效快速達到隧道變形監測的目的，且監測分析結果均能符合監測規範(變形量 3mm/年)，且三維變形分析模型可獲得精度更佳的分析結果。然而各分析模型的處理程序及資料處理效能都尚有待改進之處，將於第五章進一步討論。

第五章 結論及建議




工程監測有五種需求特性：高精度、全面性、即時性、現地可適應性及軟體成本，然而隧道監測的作業過程往往費時又耗人力，且監測結果的精度不盡然能符合監測規範。現行的工程監測方式多元，但傳統監測方式及攝影測量都難以兼顧上述五種需求，而光達不僅具有可以快速自動收集三維空間資訊的特性，且其精度可以達到公釐級，故常被用於工程應用及科學研究上。然而光達資料後處理程序是影響整體分析結果的重要關鍵，根據前人研究顯示常有處理效能不佳或浪費其它原始資訊等問題。有鑑於此，本研究目的為如何快速有效的處理光達的測量資料並發揮原始資料的應有品質及達到監測所需的精度。本章針對本研究所建立之各種變形分析模型及數值分析結果提出以下結論、建議及未來工作。

5.1 結論

影響監測結果速度的因素有兩方面：監測工作的作業流程及監測資料的處理程序。光達可以快速自動收集三維空間資訊，但受到儀器特性的影響，當監測目標與儀器中心之距離愈長時，其精度愈差、點雲密度愈低，因此不同測站間的邊界點雲密度可能過低而影響分析結果，故監測工作的事前規畫極為重要，不僅可減少補測的機會，亦能縮短儀器移動及擺設的時間，進而提高整體監測工作的效益。此外，監測時間亦是重要影響因素，光達掃描時間極短，以本研究之實驗為例，單次掃描時間僅需 5 分鐘。但在不影響用路人權益下，應盡可能避免進行交通管制，故車流量變會影響掃描品質，因此選擇離峰時間(如深夜)不僅不需進行交通管制，亦能減少因車輛通行造成遮蔽效應的機會。

監測資料的處理程序不僅影響結果分析的速度，更重要的是其分析結果的品質是否符合監測規範，足以作為有效的參考依據，因此本研究提出二維變形分析模型及三維變形分析模型，以獲得符合速度及品質的分析結果。現行隧道變形監測是以內空變位為主，即以斷面為單位判別是否發生變形現象，二維變形分析模型即據此建立。透過建立斷面模型，比對不同時期、相同位置的原始斷面模型發



生的軸向變形作為變形訊號。由於二維變形分析模型需經過兩次計算方能獲得變形訊號，容易因此產生額外的誤差，故再進一步建立以面對面比對方式的三維變形分析模型，此法是以光達原始點雲的資料形式進行變形比對分析，以最小距離投影法獲得的距離即為變形訊號。根據本研究之數值分析成果可獲得以下結論：

1. 二維變形分析模型及三維變形分析模型均可自動化進行變形分析，提高整體分析效益。
2. 由光達獲取之監測資料，透過分析模型可偵測出隧道內任一斷面或任一點上發生的變形訊號。
3. 二維變形分析獲取之變形訊號的精度符合監測規範，但三維變形分析獲取之變形訊號的精度較二維變形分析結果高。
4. 使用本研究方法進行變形分析時應選取點雲密度較高者作為基準期，可得到品質較高的變形分析結果。

5.2 建議及未來工作

1. 由本研究可知，光達係非常適切用於隧道監測的儀器，其優點除具有可以快速自動收集高精度三維空間資訊的特性外，透過掃描時記錄各掃描點的反射強度值，於後處理程序時可據此觀察非變形現象的異常，例如滲水、裂縫等無法以坐標值進行判斷的異常現象。利用反射強度值可以彌補攝影測量具有影像資料而光達欠缺的特性，使光達應用於隧道監測工作時能獲得更全面的監測資料，而非侷限於變形監測。然而隧道內部的襯砌品質難以控制，當隧道內部較為粗糙時，容易因遮蔽現象造成資料缺失的問題，因此惟有透過事前規劃工作設計測站位置，以提高監測工作的效益。
2. 本研究之目的係提出一針對雷射掃描技術之後處理的有效方法，進而達到對監測工作的效益。然而考量實務上的需求及限制，大量的實際資料易造成監測單位於建立資料庫或存取資料的負擔，故監測工作可分為二個面向，依據不同的

需求選擇不同的監測方法，更能增加監測工作的效率。針對全面性的隧道資料或模型時，以雷射掃描技術獲取資料及進行比對可節省時間及人力成本；針對範圍較小或特定範圍內的隧道斷面，可於斷面上建立固定監測點，以傳統測量方法(如全測站)獲取監測資料，藉由監測點監的變化進行隧道變形的判斷。不論是點雲資料或全測站獲取之點位資料，均是實際三維物空間坐標，僅需透過共軛點即可將所有實際資料轉換至相當坐標基準下比較，因此針對不同的需求選擇不同的監測方法可提升監測效率，亦不會增加資料處理的負擔。

3. 一般而言，公路隧道通常以里程數做為空間資訊之描述基準，隧道本體發生變形現象亦比照辦理，但光達每次掃描獲取的點雲資料，都會因儀器初始位置及姿態的不同，而建立在不同的區域坐標系中，因此為了方便監測人員描述潛在發生變形處或已發生變形處，二維變形分析模型的預處理程序中，加入改變隧道車行方向與 y 軸一致的步驟，使變形分析時得以 y 坐標描述之。然而隧道常受到地形影響而成非直線，而斷面模型需與行車方向垂直，因此會增加建立斷面模型的困難度。

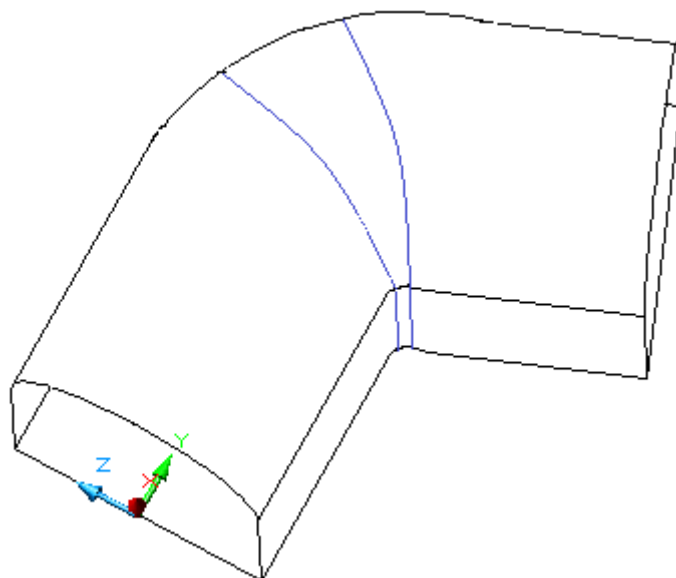
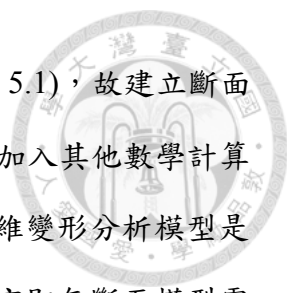


圖 5.1 斷面模型與行車方向垂直。藍色為與行車方向垂直之斷面



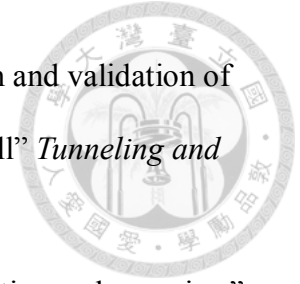
由隧道轉彎處起，隧道車行方向逐漸與 y 軸不平行(見圖 5.1)，故建立斷面模型時會更加困難，因原以 y 坐標描述的方式已不可行，需加入其他數學計算方式方能獲取不同時期的相同斷面，以進行變形分析。而三維變形分析模型是以原始資料，進行面對面的變形分析，不需建立斷面模型，亦即無斷面模型需與車行方向垂直的問題，因此建議可以三維變形分析模型作為隧道監測工作的變形分析方法。

4. 三維變形分析模型的處理速度較二維變形分析模型低，原因為三維變形分析模型的比對過程是比對期上的點都需搜尋基準期上所有的點雲以找出最鄰近三點，受到監測資料的點數及硬體設備的影響，會大幅增加分析處理的速度。未來除了科技進步改善硬體設備外，期望透過改善分析處理的邏輯及數學模式增加分析速度。

參考文獻



- Akca, D., 2003. "Full Automatic Registration of Laser Scanner Point Clouds" In: Gruen, A., Kahmen, H. (Eds.), *Optical 3D Measurement Techniques VI*, pp.330-337.
- Capart, H., Young D. L., and Zech Y., 2002. "Voronoi imaging methods for the measurement of granular flows" *Experiments in Fluids* 32(1), 121-135
- Douxchamps, D., Devriendt D., Capart, H., Craeye, C., Macq, B., and Zech, Y., 2005. "Stereoscopic and velocimetric reconstructions of the free surface topography of antidune flows" *Experiments in Fluids* 39, 533-551
- Habib, A., Mwafag, G., Michel, M., and Al-Ruzouq, R., 2005. "Photogrammetric and LiDAR Data Registration Using Linear Features" *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(6), 699-707.
- Han, J.Y., 2010. "A Noniterative Approach for the Quick Alignment of Multistation Unregistered LiDAR Point Clouds" *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7(4), 727-730
- Mikhail E.M., 1981. *Analysis and Adjustment of Survey Measurements*, New York, Chapter 6, 160-179.
- Mikhail, E. M., Bethel, J. S., McGlone, J. C., 2001. *Introduction to Modern Photogrammetry*. John Wiley and Sons, Inc, Chapter 4, 92.
- Optech Incorporated, 2006. Brochure ALTM Gemini. <<http://www.optech.ca/pdf/ASP-Airborne-Brochure-130318-WEB.pdf>>
- Optech Incorporated, 2006. Brochure Lynx Mobile Mapper. < http://www.optech.ca/pdf/EN_lynx_brochure_SS_111031_web.pdf>
- Optech Incorporated, 2006. Brochure ILRIS-3D Intelligent Laser Ranging and Imaging System. < <http://www.optech.ca/pdf/ILRIS-Spec-Sheet-130215-WEB.pdf>>



- Wang T. T., Jaw J. J., Chang Y. H. and Jeng F. S., 2009. "Application and validation of profile-image method for measuring deformation of tunnel wall" *Tunneling and Underground Space Technology*, 24, 136-147.
- Wehr, A. and Lohr, U., 1999. "Airborne laser scanning – an introduction and overview" *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, 68–82
- Zoller + Fröhlich GmbH, 2012. Brochure Z+F IMAGER 5010. <http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Broschueren/Z_F_IMAGER_5010_E_FINAL_kompr.pdf>
- 王名玉，2010。多尺度張量應用於 3D 點雲套合之研究，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- 王泰典、莊海岳、邱雅筑、李佳翰、鄭富書，2009。微變監測在營運中隧道穩定評估之應用，第八屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會。
- 江怡萱、吳宇、韓仁毓，2011。應用多測站光達技術於牛鬥橋三維模型快速建構，牛鬥橋現地實驗研討會會議手冊，pp7-1~7-16。
- 李晉榮，2011。影像法於隧道剖面量測之應用，國立臺灣大學土木工程學系碩士論文。
- 呂曜宇，2008。地面光達資料特性探討及分類應用，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- 林柏宏，2012。潛盾隧道測量精度控制與測量模式之探討，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
- 邱雅筑、王泰典、鄭富書、黃燦輝，2007。攝影測量於隧道檢測之應用，第七屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會。
- 許志豪，2008。雷射剖面影像法及剖面變形之成因回溯探討，國立臺灣大學土木工程學系碩士論文。
- 陳家輝，2011。改良式影像剖面法應用於隧道襯砌剖面檢測，國立臺灣大學土木



工程學系碩士論文。

陳國永，2004。3D 雷射掃描技術應用於隧道變形量測之研究，國立中興大學土木工程學系碩士論文。

曹峻璋，2006。三維雷射掃描技術於隧道工程之研究，國立臺灣大學土木工程學系碩士論文。

曾義星、史天元，2002。三維雷射掃描技術及其在工程測量上之應用，第二十一屆測量學術及應用研討會。

黃建銘，2009。應用點雲點線面特徵進行地面光達多測站資料結合之聯合平差，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。

黃燦輝、鄭富書，1997。「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(I)」，交通部。

黃燦輝、林銘郎、王泰典，2008。「隧道襯砌非破壞性檢測技術之開發總結報告書」，鐵路改建工程局東部工程處委託研究報告。

劉燈烈，2004。地面光達點雲資料的平差結合與影像敷貼，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。

趙鍵哲、莊子毅，2008。以三維直線特徵進行地面光達點雲套合，航測及遙測學刊，13(3)，pp.169-182

蔡宗倫、林祥曾、劉榮寬、李興緯，2008。ICP 演算法於空載光達點雲資料誤差改正之研究，測量工程，50(1-2)，pp.37-52

賴彥儒，2013。場址變位之跨尺度多時序量測整合技術-以隧道工程為例，國立臺灣大學土木工程學系碩士論文。

「地籍測量實施規則」，公布日期：民國 92 年 03 月 25 日，民國 100 年 04 月 15 日修正。

附錄



附錄 A

表 A.1 精密導線測量之精度規範(地籍測量實施規則，2011)

類 別		一 等		二 等		三 等		四 等			
		甲 級		乙 級							
導 線		在 10 至 20 公里為原則		在 5 至 10 公里為原則		在 2 至 5 公里為原則		在 1 至 3 公里為原則		在 0.3 至 1.5 公里為原則	
水 平 角 觀 測	使用儀器	0".2		0".2		1"		1"		1"	
	測回數	16		8		12		6		8	
	各觀測值與平均值之差不得超過	4"		4"		5"		4"		5"	
邊 長 測 量 標 準 誤 差		$\frac{1}{600,000}$		$\frac{1}{300,000}$		$\frac{1}{120,000}$		$\frac{1}{60,000}$		$\frac{1}{30,000}$	
野 天 向 頂 觀 測 距	測回數	3		3		2		2		2	
	觀測值之差不得超過	10"		10"		10"		10"		20"	
	已知高程點間之圖形數	4-6		6-8		8-10		10-15		15-20	
天 文 方 位 角	方位角檢核相距之測站數	5-6		10-12		15-20		20-25		30-40	
	各夜觀測之測回數	16		16		12		8		4	
方 位 角	觀測夜數	2		2		1		1		1	
	標準誤差	0".45		0".45		1".5		3".0		8".0	
方位角閉合差(右列式中 N 為測站數)		每測站 1".0 或 2".0 \sqrt{N}		每測站 1".5 或 3".0 \sqrt{N}		每測站 2".0 或 6".0 \sqrt{N}		每測站 3".0 或 10".0 \sqrt{N}		每測站 8".0 或 30".0 \sqrt{N}	
經方位角平差後位置閉合差或閉合比數不得超過(右列式中 m 為公尺, k 為導線長度之公里數)		0.04m \sqrt{K} 或 $\frac{1}{100,000}$		0.08m \sqrt{K} 或 $\frac{1}{50,000}$		0.2m \sqrt{K} 或 $\frac{1}{20,000}$		0.4m \sqrt{K} 或 $\frac{1}{10,000}$		0.8m \sqrt{K} 或 $\frac{1}{5,000}$	
適 用 場 合		(與三角測量相同)									