計畫編號：ARDSWC-112-035

利用手持行動裝置輔助水保工地之三維空間調查與智能管理

Using Handheld Mobile Devices to Assist 3D Space Survey and Intelligent Management of Soil and Water Conservation Sites

（成果報告）

執 行 單 位：農業部農村發展及水土保持署

執 行 期 間：112 年 02 月 08 日至 112 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：林秉賢 助理教授

農業部農村發展及水土保持署　編印

中華民國 112 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考）

利用手持行動裝置輔助水保工地之三維空間調查與智能管理

摘要

水土保持工程的環境勘查，除了現地影像的紀錄，環境的資訊、位置資訊、工程的幾何資訊都成為現地勘查必須記錄的一環，但這些資訊的獲得，相機、GPS、全測站測量儀、UAV 的操作成果資訊獲得的重要工具，但上述傳統測量工具普遍沉重不易攜行。而智慧型手機的出現及應用已是生活的一部分，尤其在工程人員的現場勘查中，拍照已成為必要的工作，而傳統相機已成為首批被手機取代的設備。但除了拍照以外，手機還有甚麼其他功能可以代替傳統的調查設備，成為環境勘查資訊獲得的工具。

本研究首先透過 IPhone LiDAR 針對本校開放空間設施的掃描建構，並比對掃描速度、高度及環境背景等因素，對 IPhone LiDAR 成像及數值成果之差異，爾後再與傳統量測工具進行比較；將手持式 IPhone LiDAR 掃描技術用於施工中之工地，其工程樣區選定由農村發展及水土保持署內各轄區中施工中之水土保持工程及農村再生工程進行篩選，並針對工程內容既有構造物進行掃描。

透過上述的掃描成果，建置用於上傳之資料庫平台，並作為展示使用。將數據的差異比對與點雲資料的數化分析後，並利用量測的成果進一步追蹤工地及管理。

關鍵字：IPhone LiDAR、工地測量、點雲數化

Using Handheld Mobile Devices to Assist 3D Space Survey and Intelligent Management of Soil and Water Conservation Sitesexpansion

Abstract

In the environmental survey of soil and water conservation projects, in addition to the recording of on-site images, environmental information, location information, and geometric information of the project have all become a part of the on-site survey that must be recorded. However, the acquisition of this information requires cameras, GPS, and full station measurements. It is an important tool to obtain information on the operation results of instruments and UAVs, but the above-mentioned traditional measurement tools are generally heavy and difficult to carry. The emergence and application of smart phones have become a part of life. Especially during on-site inspections by engineering personnel, taking pictures has become a necessary task, and traditional cameras have become the first equipment to be replaced by mobile phones. But besides taking pictures, what other functions does a mobile phone have that can replace traditional survey equipment and become a tool for obtaining environmental survey information?

This study first uses IPhone LiDAR to scan the school's open space facilities, and compares factors such as scanning speed, height, and environmental background to compare the differences in IPhone LiDAR imaging and numerical results, and then compares it with traditional measurement tools; Handheld IPhone LiDAR scanning technology is used on construction sites under construction. The project areas are selected

from the soil and water conservation projects and rural regeneration projects under construction in each jurisdiction of the Rural Development and Soil and Water Conservation Department, and based on the existing structure of the project content objects are scanned.

Through the above scanning results, a database platform for uploading is built and used for display. After comparing the data differences with digital analysis of point cloud data, the measurement results are used to further track the construction site and management.

Keywords: IPhone LiDAR, Construction site survey, Point cloud digitization

目次

摘要 I
ABSTRACT II
目次 IV
圖次 VI
表次 IX
第一章 前言 1
第一節 計畫緣起 1
第二節 計畫擬解決問題 1
第三節 計畫目的 2
第四節 計畫內容 2
第五節 計畫成果 3
第六節 實施方法與步驟 3
第二章 研究文獻 5
第一節 3D 感測影像技術 5
第二節 智慧手機 dToF LiDAR 15
第三節 LiDAR 應用 27
第四節 攝影測量 32
第三章 設備及方案說明 43
第一節 量測設備 43
第二節 量測方案說明 58
第四章 量測成果與分析 66

第一節 量測成果 66
第二節 成果分析 82

第五章 資料庫建置 94
第六章 結論與建議 97

第一節 結論 97
第二節 建議 97

參考文獻 99
附件一、審查意見回覆 100
附件二、IPHONE 與 IPAD 的 LIDAR 測量結果 106
附件三、IPHONE LIDAR 精度比對 122
附件四、工區各進度現況掃描 128
附件五、工區各進度溝造物掃描成果 138
附件六、構造物尺寸量測成果 148

圖次

圖 1-1 研究流程圖 4
圖 2-1 3D 立體影像感測技術原理示意圖 6
圖 2-2 I Phone X 所使用的 3D 立體影像感測技術 7
圖 2-3 電流輔助光子調節器 10
圖 2-4 iToF 距離和精度之間的關係 11
圖 2-5 iToF 多路徑干擾問題 12
圖 2-6 dToF 數光子的方法 14
圖 2-7 iToF 原理示意圖 15
圖 2-8 dToF 原理示意圖 16
圖 2-9 dTOF 技術應用改善 AR 應用內容 17
圖 2-10 IPHONE 感應單元 17
圖 2- 11 ToF 圖像傳感器 21
圖 2-12 LiDAR 示意圖 28
圖 2-13 地面數據示意圖 30
圖 2- 14 繪製電纜懸鏈線 31
圖 2- 15 攝影測量呈現 32
圖 2-16 地圖和 3D 模型 33
圖 2-17 無人機相機 34
圖 2-18 無人飛行載具搭載 LiDAR 35
圖 2- 19 正射地圖示意圖 35
圖 2-20 感測器雷達 37
圖 2-21 多層光學雷達 38
圖 2-22 固態光學雷達 39

圖 2-23 社交距離感測 40
圖 2-24 應用範例 41
圖 3-1 無人載具空拍工作流程圖 44
圖 3- 2 整體航拍規劃示意圖 46
圖 3-3UAV 空標佈設型式 46
圖 3- 4 空標布設成果 47
圖 3-5 控制點布設及控制點 e-GPS 測量 47
圖 3-6 無人載具空拍作業流程 48
圖 3- 7 航高設定與地面解析度相關性 49
圖 3-8 影像處理成果歷程(卑南溪出海口範例) 50
圖 3- 9 航拍影像成果範例 51
圖 3- 10 控制點佈設範例 52
圖 3- 11 航測點布設及控制點測量作業情形 53
圖 3- 12 三腳架的三個伸縮螺旋旋緊之後安放全站儀 53
圖 3- 13 水平腳量測 55
圖 3-14 相異移動速度 59
圖 3-15 距地高度差異 59
圖 3- 16 測量目標種類 60
圖 3- 17 各項工具測量 61
圖 3-18 工程選定 62
圖 3-19 各項工具量測過程 63
圖 4-1 20cm/s、40cm/s、60cm/s 點雲數、成像差異比較 66
圖 4-2 0.5m、1m、1.5m 點雲數、成像差異比較 67
圖 4-3 工區現況照 76
圖 4-4 三義鄉雙潭社區香菇亭周邊環境改善工程現況 80

圖 4-5 旱坑里 9 鄰野溪治理工程現況.....81
圖 4-6 寶石里 6 鄰石頭坑野溪治理工程現況.....81
圖 4- 7 傳統尺規使用現況.....83
圖 4- 8 全站儀使用情況與成果產製.....83
圖 4- 9 無人飛行載具產製影像及數值資料.....84
圖 4- 10 手持式 IPhone LiDAR 成像差異.....85
圖 4-11 掃描目標物限制之情形.....91
圖 4-12 階高(表面美化前)掃描成像(左)、現況(右).....91
圖 5- 1 資料庫表單填寫介面.....94
圖 5- 2 資料庫表單填寫介面.....94
圖 5- 3 工程案件列表清單介面.....95
圖 5- 4 資料庫平台瀏覽施工圖報告書文件.....95
圖 5- 5 資料庫平台 3D 掃描成果展示.....96
圖 5- 6 資庫平台 3D 掃描成果展示.....96

表次

表 1-1 計畫甘梯圖 4
表 2- 1 光學偵測三種技術比對 41
表 4-1 四軸旋翼型無人載具相關設備 45
表 4- 2 構造物量測尺寸及誤差 68
表 4- 3 測量項目工具表 69
表 4- 4 鋼捲尺、箱尺量測成果表 69
表 4- 5 全站儀量測成果表 71
表 4- 6 手持 IPhone LiDAR 量測成果表 72
表 4- 7 UAV 影像成果表 75
表 4-8 工區構造物成果表 77
表 4-9 工區排水溝斷面測量成果表 78
表 4-10 相異環境成像表 87
表 4-11 各設備之影像成果展示 89
表 4-12 工地調查實務掃描數化成果 92
表 4-13 工區實作掃描時間 93

第一章 前言

第一節 計畫緣起

水土保持工程的環境勘查，除了現地影像的紀錄，環境的資訊、位置資訊、工程的幾何資訊都成為現地勘查必須記錄的一環，但這些資訊的獲得，相機、GPS、全測站測量儀、UAV 的操作成果資訊獲得的重要工具，但上述傳統測量工具普遍沉重不易攜行。而智慧型手機的出現及應用已是生活的一部分，尤其在工程人員的現場勘查中，拍照已成為必要的工作，而傳統相機已成為首批被手機取代的設備。但除了拍照以外，手機還有甚麼其他功能可以代替傳統的調查設備，成為環境勘查資訊獲得的工具。

自 IPhone 12 Pro 的誕生其增加搭載 Lidar Scanner，加上新機的發展演進改善，除了影像畫質的提升外，整體的計算速度翻倍，搭載 5G 的傳輸。若能整合該設備與既有手機內三軸加速度器與 GPS 與 5G 傳輸及先進計算能力，搭配軟體與雲端資料庫的應用，是否可以改善出野外勘查準確資訊的獲得與查詢應用，或許可以提升整體工程需求規畫及設計前、施工中與後續維護管理是相當重要的利器。

第二節 計畫擬解決問題

本研究主要透過手持設備的硬體與軟體的整合，搭配 5G 傳輸技術的雲端應用，解決野外勘查時，利用簡便的工具快速獲得工程與環境幾何資訊，作為後續防災規劃與工程改善設計的適當準確性資訊的整合應用。

第三節 計畫目的

本研究主要透過手持設備的硬體與軟體的整合，搭配 5G 傳輸技術的雲端應用，將工程資訊的調查，地形的量測，位置的資訊與水文地質環境的參考資訊，整合在多時期查詢系統及電子化表單，以供工程生命週期資訊化管理與檢討改善之參考依據。

第四節 計畫內容

1. 文獻回顧:透過不同國內外對 LiDAR，影像測量、3D 影像判釋及近景攝影測量等資訊做回顧。

2. 透過不同的測量方式，針對常見之已完工水土保持工程構造物做量測，包含傳統的全測站、RTK GNSS 測量(施工圖)與 UAV 航空攝影方式，並藉由 IPhone LiDAR 進行掃描比對，找出最佳之掃描建檔與管理方式。

3. 藉由已建構的比對模式，針對新建工程在不同施工階段做多期工程進度比對，建構數位影像測量之工程資訊化抽查，以達成工程品質權生命週期之追蹤考核。

4. 透過測量方式，針對已完工在服務之工程構造物與新建構造物做周遭環境之點雲比對，如河道的沖淤變化、坡面的植生變化、結構物之狀態，了解不同測量產品的精度與應用限制。

5. 透過已建構的掃描方式，搭配雲端資料庫的建置，了解構造物調查與施工日誌紀錄及工程周遭環境調查，建立工程生命週期管理系統，並輔以快速檢算構造物施工進度自動化表單的資訊化管理與品質進度管控依據。

第五節 計畫成果

透過標準化測量方式，修正近景攝影測量誤差，作為各項水土保持工程構造物生命週期資訊化表單的建置，可做為日後資訊化管理的應用參考，順勢檢視與建立整體標準化資訊的依據。

第六節 實施方法與步驟

1. 前言:內容包含計畫緣由、計畫目的、預期目標、人力組成、時間規劃、預期成果等。
2. 文獻蒐集(透過不同國內外對 LiDAR，影像測量、3D 影像判釋及近景攝影測量等資訊做回顧。)
3. 藉由已建構的比對模式，針對新建工程在不同施工階段做多期工程進度比對，建構數位影像測量之工程資訊化抽查，以達成工程品質權生命週期之追蹤考核。
4. 透過測量方式，針對已完工在服務之工程構造物與新建構造物做周遭環境之點雲比對，如河道的沖淤變化、坡面的植生變化、結構物之狀態，了解不同測量產品的精度與應用限制。
5. 透過已建構的掃描方式，搭配雲端資料庫的建置，了解構造物調查與施工日誌紀錄及工程周遭環境調查，建立工程生命週期管理系統，並輔以快速檢算構造物水理的狀況與施工進度自動化表單的資訊化管理與品質進度管控依據。

其流程圖與時晨表如圖 1-1 及表 1-1。

表 1-1 計畫甘梯圖

工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
文獻回顧	■	■	■									
測量驗證			■	■	■							
檢測模式建構				■	■	■			■	■	■	
資料庫建構						■	■			■	■	■
現地測量			■	■	■			■	■	■		
分析討論					■	■	■			■	■	■
時間控制			期初				期中				期末	成果

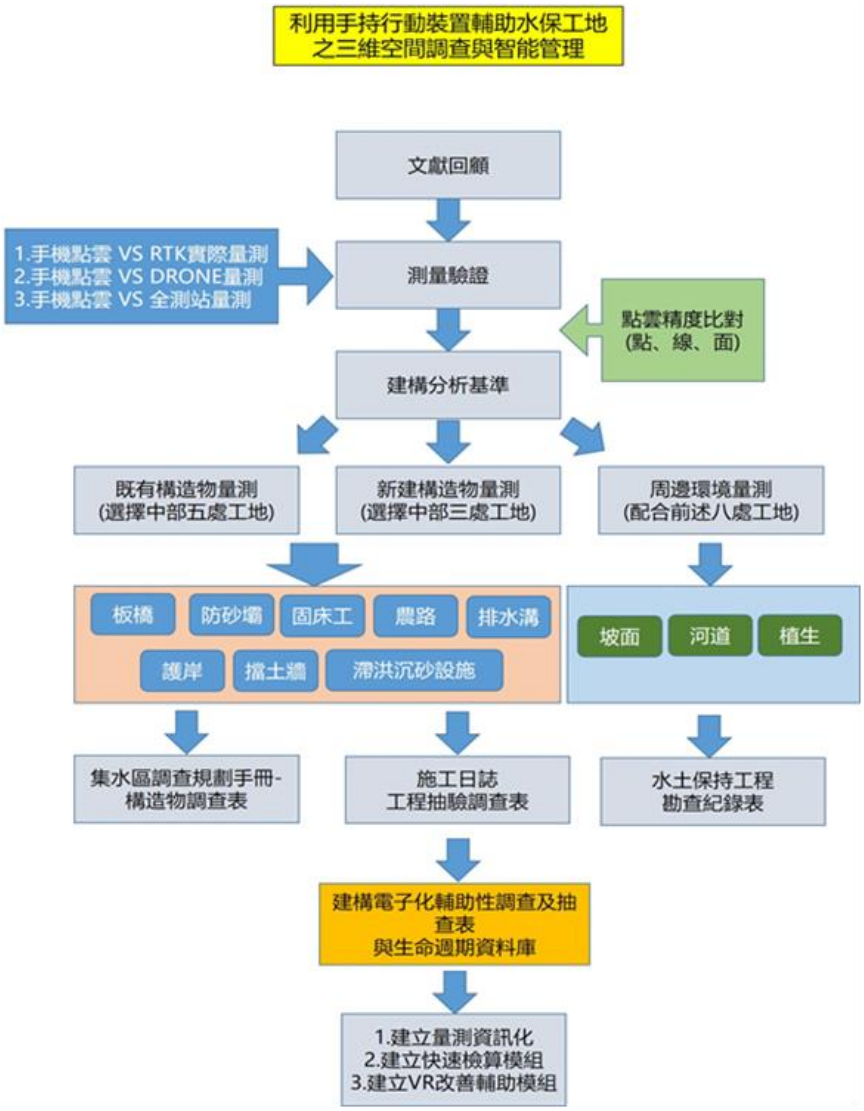


圖 1-1 研究流程圖

第二章 研究文獻

第一節 3D 感測影像技術

數位相機只能取得平面彩色影像，完全沒有深度的資訊，這代表當我們看到一張照片，只知道這個人的臉部有多寬多高，卻不知道他臉部的立體結構，例如：鼻子有多挺(有多深)，為了取得影像的深度資訊，近年來許多廠商投入研發，目前比較成熟的技術有下列兩種：

1. 飛時測距(ToF：Time of Flight)：利用發光二極體(LED：Light Emitting Diode)或雷射二極體(LD：Laser Diode)發射出紅外光，照射到物體表面反射回來，由於光速(v)已知，可以利用一個紅外光影像感測器量測物體不同深度的位置反射回來的時間(t)，利用簡單的數學公式就可以計算出物體不同位置的距離(深度)，如＜圖 2-1(a)＞所示。知識力 www.ansforce.com。

2. 結構光(Structured light)：利用雷射二極體(LD：Laser Diode)或數位光源處理器(DLP：Digital Light Processor)打出不同的光線圖形，經由物體不同深度的位置反射回來會造成光線圖形扭曲，例如：打出直線條紋的光線到手指上，由於手指是立體圓弧形造成反射回來變成圓弧形條紋，進入紅外光影像感測器後就可以利用圓弧形條紋反推手指的立體結構，如＜圖 2-2(b)＞所示。

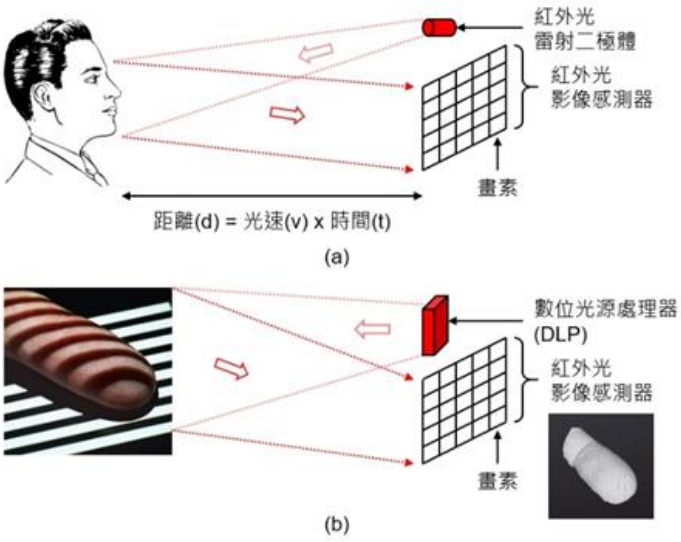


圖 2-1 3D 立體影像感測技術原理示意圖

一、 TrueDepth 相機

蘋果將 IPhone X 所使用的 3D 立體影像感測技術稱為「TrueDepth 相機」，結合了上述的兩種技術，如＜圖 2-2＞所示，TrueDepth 相機包括 700 萬畫素的 CMOS 影像感測器，配合紅外光相機(Infrared camera)、泛光照明器(Flood illuminator)、接近感測器(Proximity sensor)、環境光感測器(Ambient light sensor)、點陣投射器(Dot projector)等元件，以下簡單介紹每個元件的功能：

1. 泛光照明器(Flood illuminator)：使用「低功率」的垂直共振腔面射型雷射(VCSEL：Vertical Cavity Surface Emitting Laser)，發射出「非結構(Non-structured)」的紅外光投射在物體表面。
2. 接近感測器(Proximity sensor)：使用「低功率」的垂直共振腔面射型雷射(VCSEL)發射紅外光雷射，當有物體靠近時會反射雷射光，因此手機偵測有物體接近，這個元件很早之前智慧型手機就有了，一般都是安裝在擴音器(Speaker)旁邊，但是以前通常是使用紅外光發光二極體(IR LED)，可以偵測的距離較短，當使用者講電話將手機靠近耳朵時，接近感測器偵測到耳朵接近就知道使用者要

講電話，會自動關閉螢幕節省電力消耗。

3. 環境光感測器(Ambient light sensor)：使用光感測器(PD：Photo Detector)可以偵測環境光亮度，在明亮的太陽下使用者眼睛瞳孔縮小，因此自動將螢幕調亮讓使用者容易觀看；在陰暗的室內使用者眼睛瞳孔放大，因此自動將螢幕調暗避免使用者感覺太刺眼。
4. 點陣投射器(Dot projector)：使用「高功率」的垂直共振腔面射型雷射(VCSEL)發射紅外光雷射，經由晶圓級光學(WLO：Wafer Level Optics)、繞射光學元件(DOE：Diffractive Optical Elements)等結構，產生大約 3 萬個「結構(Structured)」光點投射到使用者的臉部，利用這些光點所形成的陣列反射回紅外光相機(Infrared camera)，可以計算出臉部不同位置的距離(深度)。

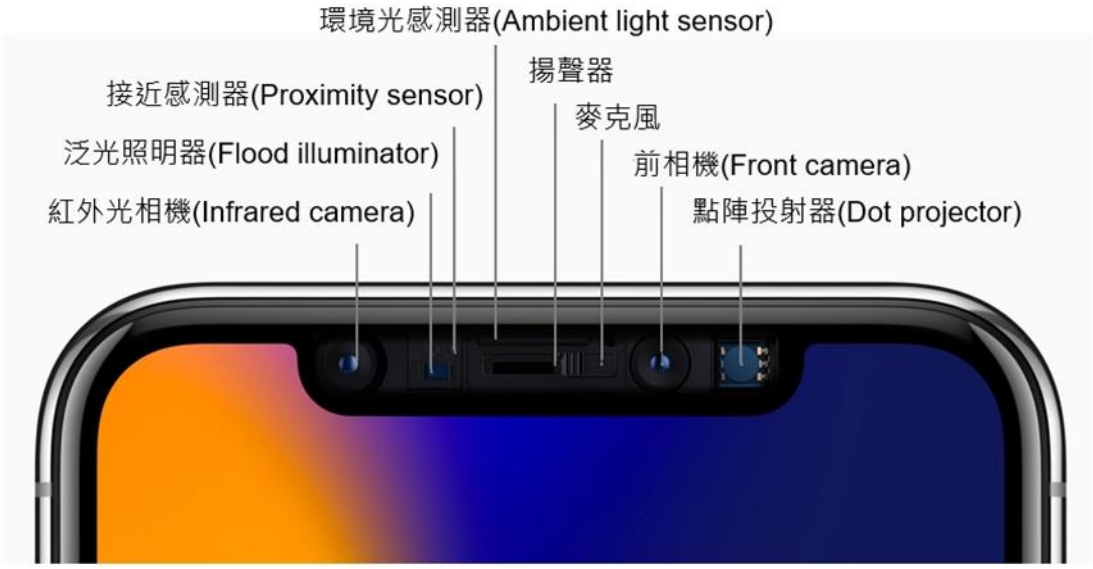


圖 2-2 I Phone X 所使用的 3D 立體影像感測技術

資料來源：www.apple.com

二、 Face ID 解鎖原理與步驟

Face ID 解鎖主要分為兩個步驟，首先必須辨識接近手機的是否為刻意靠近的臉部，或者只是使用者不小心由手機前面晃過去而已；

確認是刻意靠近的臉部之後，才開始進行人臉辨識，從前面的介紹可以發現，啟動 Face ID 解鎖必須同時開啟好幾個元件，是有些耗電的，因此必須確認是刻意靠近的臉部之後，才開始進行人臉辨識。

當有臉部或物體靠近時，會先啟動接近感測器(Proximity sensor)，再由接近感測器發出訊號啟動泛光照明器(Flood illuminator)，發射出非結構(Non-structured)的紅外光投射在物體表面，再由紅外光相機(Infrared camera)接收這些反射的影像資訊，傳送到手機內的處理器，IPhone X 使用蘋果自行開發的 A11 處理器，內建雙核心的「神經網路引擎(NE：Neural Engine)」，經由人工智慧的運算後判斷為臉部，再啟動點陣投射器(Dot projector) 產生大約 3 萬個光點投射到使用者的臉部形成「結構光(Structured light)」，利用這些光點所形成的陣列反射回紅外光相機(Infrared camera)，經由這些光點的偏移計算出臉部不同位置的距離(深度)，再將這些使用者臉部的深度資訊傳送到處理器，經由計算比對臉部特徵辨識是否為使用者本人。

所有的 3D 立體影像感測技術都面臨相同的問題，那就是深度資訊的精確度實際值大約只有 1%～0.1%，意思是距離 1 公尺(m)遠的物體量測出來的精確度與誤差大約是 1~10 毫米(mm)的等級，Face ID 解鎖時臉部與手機的距離大約 0.1 公尺(m)，因此精確度與誤差大約是 0.1~1 毫米(mm)的等級，這大概足夠進行臉部特徵辨識了！此外，點陣投射器(Dot projector)使用高功率的垂直共振腔面射型雷射(VCSEL)發射紅外光雷射，雖然它的功率並不是真的很高，但是長期入射到眼睛是否會造成眼球的傷害，是另外一個值得醫學界研究探討的問題。

三、 人工智慧的雲端與終端

人工智慧(AI：Artificial Intelligence)大量的學習與運算目前都借助於雲端伺服器強大的處理器來進行，早期使用 Intel 的「中央處理器(CPU：Central Processing Unit)」，後來科學家發現 Nvidia 的「圖形處理器(GPU：Graphics Processing Unit)」效能比 CPU 高 100 倍以上，Intel 經由併購 Altera 取得「可程式化邏輯陣列(FPGA：Field Programmable Gate Array)」技術來與 GPU 抗衡，另外有更多的廠商開發始發展「特定應用積體電路(ASIC：Application Specific Integrated Circuit)」，例如：Google 自行設計的「張量處理器(TPU：Tensor Processing Unit)」或 Intel 自行設計的「視覺處理器(VPU：Vision Processing Unit)」，就是一種針對人工智慧這種「特定應用」所開發的積體電路，以上這些處理器都是裝置在「雲端(Cloud side)」。然而並不是所有的應用都適合把大數據傳送到雲端處理，例如：自動駕駛車必須在車上「終端(Edge side)」進行學習與處理才能即時反應道路情況。

蘋果公司這次推出的 IPhone X 使用自行開發的 A11 處理器，內建雙核心的「神經網路引擎(NE：Neural Engine)」，專門處理影像辨識相關的機器學習、推論模型、演算法，也是一種針對人工智慧這種「特定應用」所開發的積體電路，不同的是它裝置在「終端(Edge side)」，也就是使用者的手機上，讓手機可以認識使用者的臉部特徵，蘋果公司也一再強調，使用者所有的臉部特徵都在手機終端完成，不會上傳到雲端處理，因此絕對不會有資料外洩的疑慮。

蘋果公司這次發表的 IPhone X 讓使用者能夠真實感受終端裝置的人工智慧(On-device AI)，在可以預見的未來，終端的處理器如何與人工智慧結合形成「終端智能(Edge intelligence)」，將是愈來愈熱門的

議題。

四、 iToF vs dToF

(一)、iToF 的感測器

目前 iToF 的接收端大多使用的是 CMOS Image Sensor(CIS)技術，由於 CMOS 製成相對容易整合度也相對高，故這類型的影像感測器被大量發展，這也是 iToF 較 dToF 便宜的原因，有了感測器之後，iToF 是計算發射光和反射光之間的相位延遲，其操作引用 Sony 的 IMX556 感測器所使用的 Current Assisted Photonic Demodulator(CAPD)電流輔助光子調節器來說明，如下圖 2-3：

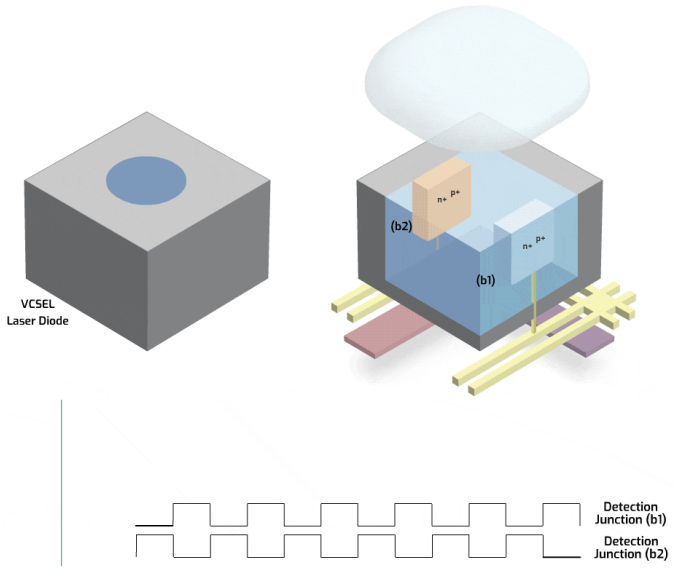


圖 2-3 電流輔助光子調節器

圖片來源：https://thinklucid.com/tech-briefs/sony-depthsense-how-it-works/

左邊的 VCSEL 是我們光達的發射端，右邊是接收端，發射端發射了一連串的訊號經過反射到接收端，接收端 b1 和 b2 就是 CAPD 光電二極管內部產生交流電壓，如此一來就會產生 drift-field(飄移場)，藉由電壓產生兩個閥門，圖裡前 5 道光訊號往 b1 閥門，最後一個光訊號往 b2 閥門如此一來就可以將光訊號轉成電訊號，上圖的 detection

junction (b1)就是前 5 個光訊號產生的圖，而 detection junction (b2)就是最後一個光訊號產生的圖，可以看到橘色(前 5 顆)的面積比較藍色(後 1 顆)的大，通過這兩個訊號，就可以計算出相位延遲。

1. iToF 的優點

因為 CMOS 感測器技術工藝變比較成熟，可以使的感測器上的像素點較多，這樣可以提升我們 3D 建模的解析度；另一個優點就是 iToF 應用場景目前較適用於中短距離，主要原因在於精度的問題，如下圖 2-4 所示，因為不管用任何的感測器在量測相位延遲的時候都一定有誤差，所以為了減少誤差影響的量測結果，我們可以提高調變的頻率 f，但根據公式，若 f 上升，那麼整體可以量測的距離就減小了，形成一個 trade off，這也是為什麼 iToF 目前較適合使用在中短距離上。

$$d = \frac{c(\text{光速})}{2}\frac{\Delta\varphi(\text{相位差})}{2\pi f(\text{頻率})}$$

$$d = \frac{c}{2}\frac{\Delta\varphi}{2\pi f} \Longrightarrow \downarrow \Delta d(\text{量測距離的誤差}) = \frac{c}{2}\frac{\epsilon(\text{相位的誤差})}{2\pi f\uparrow}$$

$$\downarrow d = \frac{c}{2}\frac{\Delta\varphi}{2\pi f\uparrow}$$

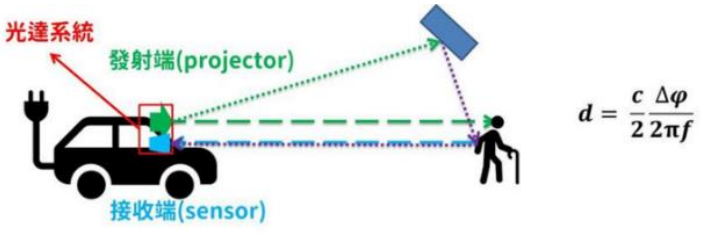
圖 2-4 iToF 距離和精度之間的關係

2. iToF 的缺點

(1). 熱雜訊(thermal noise)：iToF 是使用 CIS 的感測器技術，所以第一個缺點也很明顯就是熱雜訊(thermal noise)，熱雜訊為一般的室溫下對電子來說其實已屬高溫，所以熱雜訊會造成我們沒有接收到反射光，但卻因為溫度高使電子被釋放出來，這些雜訊就有可能造成量測距離不連續或是有誤差產生。

(2). 反射光：第二個缺點就是，因為 iToF 是將接收到的光加起來再轉換成電訊號，一般在使用上不可能避免掉環境的光線，不只是反射光，環境的光線也會打到我們的感測器上，而這種誤差隨著量測距離增加成正比，隨著距離反射光的強度也會下降，很難分出收到的訊號是反射光還是環境的光線，這個問題雖然可以在感測器上鍍膜過濾掉發射端光線以外的波長但環境光中還是存在發射端的波長，很難完全過濾。

(3). 路徑干擾：第三個缺點是多路徑干擾，由於 iToF 是計算相位延遲，其實 2pi(360°)和 4pi(720°)理論上都能化簡成 2pi(只是一個是走一圈回到原點，一個是走兩圈回到原點)，這樣一來如下圖 2-5，我們假設調製頻率 f 是 20MHz(20×10^6)，假設量測到的相位延遲是 2pi 計算出來距離就是 7.5 公尺，但我們沒辦法分辨 2pi 和 4pi(15m)的差別，這時候就需要多個調製頻率，例如：同時打出 10MHz 和 20MHz 的調製光，這樣一來就會，假設測量同一個物體頻率 20MHz 量測到的相位差是 2pi，但頻率 10MHz 量測到的相位差卻只有 pi，這樣我們就可以降低多路徑干擾的問題，但還是有一些反射的路徑可能會同時滿足兩個頻率都是 2pi，所以 iToF 上是很難根除多路徑干擾問題。



$$d = \frac{c}{2}\frac{\Delta\varphi}{2\pi f}$$

$$d = \frac{c}{2}\frac{2\pi}{2\pi 20MHz} = 7.5m \Longleftrightarrow d = \frac{c}{2}\frac{2\pi + 2\pi}{2\pi 20MHz} = 15m$$

$$d = \frac{c}{2}\frac{\pi}{2\pi 10MHz} = 7.5m$$

圖 2-5 iToF 多路徑干擾問題

(二)、dToF 的感測器

dToF 發射端使用的是脈衝光,由於脈衝光是在極短的時間內將能量瞬間釋放出來，所以使用 CMOS 類型需要將光的能量積分下的感測器顯然是不太合適的，於是 dToF 使用的單光子雪崩二極管 Single Photon Avalanche Diode (SPAD)，SPAD 就是在數光子，顧名思義就是只需要接收到單光子就能觸發產生電訊號,這樣就可以很好的測量到極短時間的脈衝光，但也因為這個感測器非常靈敏，可想而知製造上就相對於 CMOS 感測器複雜，最終成本比較高。

1. dToF 的優點

(1). 較不易受環境光的影響，SPAD 的靈敏導致環境光的光子也會進到感測器裡，為什麼反而比較不易受環境光的影響呢？主要是因為 dToF 感測器是在數光子,通常 dToF 的發射端會發射很多個脈衝光，每一個脈衝光會有時間的間隔如下圖 2-6 所示，假設我們要測量車子到行人之間的距離，即便我們在不同時間發射很多脈衝光出去,基本上反射回來的時間差要是一樣的(光行走的時間是差不多的),所以我們把所有收到的光子時間差都記錄下來並畫成直方圖，可以很明顯發現時間差 0.1 微秒(10^-6)的數量是最多的(紅色柱子)，這也表示行人與車子的距離是 15 公尺，而其他我們統計出來的時間差就是雜訊或是經過多重反射後的結果，這也就是為什麼 dToF 不易受環境光的影響，而且也比較沒有 iToF 的多路徑問題(光經過多重反射走的時間會比較久如圖可能時間差就是 0.25 微秒)。

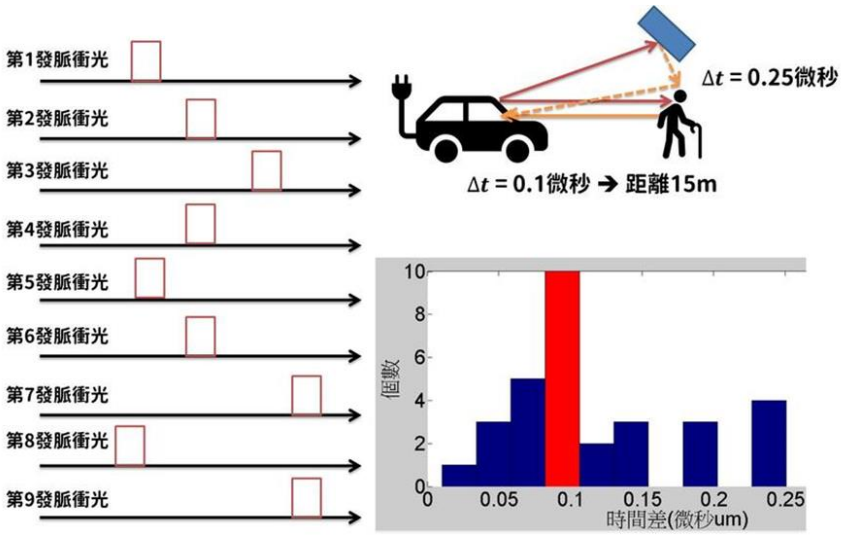


圖 2-6 dToF 數光子的方法

(2). 另一個優點是 dToF 適合檢測長距離的物件，由於脈衝光能量集中且 SPAD 計算的方式又是以數光子的形式，根據測量距離公式我們可以知道，只要時間差可以測定，dToF 測量精度並不會隨著距離增加而變差，這也是為什麼 dToF 的方法比較適合自動駕駛所使用。

2. dToF 的缺點

(1). 那 dToF 的缺點是在 SPAD 的製造難度上，尤其我們知道光速是極速，也就是說要測量一個近距離的物體，光行走的時間是極短的，所以我們的感測器就必須極為靈敏，目前能做 SPAD 的廠商也很少，這導致成本較 iToF 高很多。

(2). 第二個缺點就是感測器的解析度，傳統的 CMOS 感測器，由於製程難度較低，所以可以在同樣感測器大小底下塞入很多個像素點去感光，但 SPAD 目前製成難度高，所以同樣大小下只能塞比較少的像素點去接收光子，像素點越多深度資訊就抓得越連續也越精細。

第二節 智慧手機 dToF LiDAR

智慧手機中的 LiDAR 至於 dToF 則是透過直接向測量物體發射雷射脈衝，並測量反射脈衝和發射器之間的時間間隔，得到光的飛行時間而直接計算待測物體的距離。而 dToF 和 iToF 的原理主要差別於發射和反射光的不同，dToF 相較於 iToF 來說製作困難度要高上不少，dToF 的困難點在於要檢測的光訊號是一個脈衝訊號，因此檢測器對於光的敏感度要求非常高，常見的 dToF 感測器接收端是使用單光子崩潰二極體(SPAD)，或累崩式光電二極體(APD)感測功能一直是行動裝置創新的趨勢之一，今年蘋果在最新 IPad Pro 中，蘋果宣布使用 dToF LiDAR 技術，而該技術一在消費性電子產品亮相後，成為整個產業關注焦點。現階段 3D 感測技術共分三類，分別為立體系統 (兩眼立體成像)、結構光和 ToF，當中以結構光技術最為成熟，已經大規模應用於工業 3D 視覺領域，至於 ToF 則在行動產品市場中最被看好。ToF 透過衡量發射光與反射光的感應時間落差計算出光源與物體之間的距離。而根據測距的方式不同，目前 ToF 技術又可細分為 iToF(indirect-ToF)和 dToF(direct-ToF)兩種如圖 2-7。

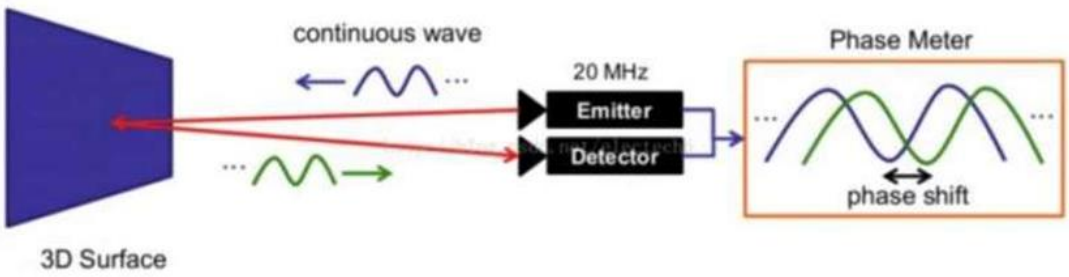


圖 2-7 iToF 原理示意圖

iToF 是利用發射特定頻率的光，檢測反射光和發射器之間的位置差距，測量飛行時間 iToF 間接測量紅外線飛行時間，具備低成本、較高解析度優勢，適用於短距離測距。但因為 iToF 測距距離不能太

大，且環境光源會對電路產生干擾，所以目前 iToF 主要應用在手機臉部辨識、手勢辨識等測距距離較短的場景中

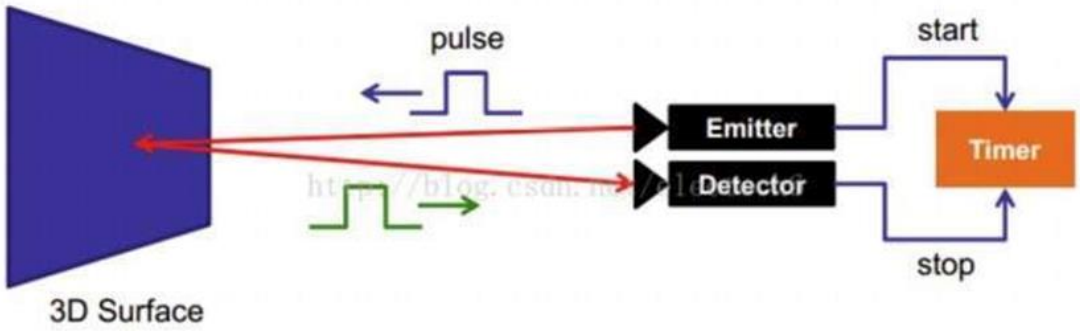


圖 2-8 dToF 原理示意圖

至於 dToF 則是透過直接向測量物體發射雷射脈衝，並測量反射脈衝和發射器之間的時間間隔，得到光的飛行時間而直接計算待測物體的距離。而 dToF 和 iToF 的原理主要差別於發射和反射光的不同，dToF 相較於 iToF 來說製作困難度要高上不少，dToF 的困難點在於要檢測的光訊號是一個脈衝訊號，因此檢測器對於光的敏感度要求非常高，常見的 dToF 感測器接收端是使用單光子崩潰二極體(SPAD)，或累崩式光電二極體(APD)。

SPAD 是 dTOF 技術的核心，技術難度高且製作工藝複雜，目前世界上極少廠商具備量產能力，SONY 與意法是當中主要廠商同時 dTOF 要應用在手機等小型消費性電子產品上更為困難，目前一般熱門應用領域在車載 LiDAR 中，而消費電子領域只有蘋果在 IPad 上實現商用。2020 新款 IPad Pro 搭載 dToF LiDAR 技術，透過這項技術可以使 IPad 取得 3D 空間的「深度」數據，建立更詳細室內空間訊息，模擬出擺放新傢俱後的實際情況。IKEA 的 IKEA Place App，利用 AR 讓居家產品的外觀和在家中的擺放效果直接呈現在消費者眼前圖(圖 2-9)。



圖 2-9 dTOF 技術應用改善 AR 應用內容

dTOF 技術的應用可望改善 AR 應用內容，加速 AR 在一般消費市場普及，蘋果在 2017 年便針對開發者推出用於 iOS 上 AR 應用的 ARKit 開發工具，2020 年推出的 IPad Pro 則是在消費性電子裝置中首度搭載 dToF 模組，可視為蘋果針對 5G 時代 AR 領域進一步佈局。

IPad Pro 搭載的 LiDAR，採用 Sony 3 萬像素 10μm dTOF 圖像感測器，SPAD 陣列的感測器，並整合 Lumentum 的 VCSEL 晶片和 TI 的 VCSEL 驅動晶片，能達到 PS 級時間解析度，可實現 5 公尺範圍內的 3D 感測與成像，具備更快的 AR 建構模組速度、更高的測量精準度和更少錯位。



圖 2-10 IPHONE 感應單元

蘋果公布新款 IPad Pro 最大亮點就是搭載 dToF 技術的 LiDAR 模組。不過要加速在手機市場的能見度首要先克服如何小型化，一旦能做到適用於手機的輕、薄、短、小後，dToF 需求可望攀升。目前不少旗艦智能手機已經部署了 ToF 3D 攝像頭，但是基本都是基於 iToF 技術，相比之下，dToF 具備低功耗、抗干擾等優勢，適用於對測距精度要求高的較遠距離測距場景。伴隨蘋果 IPhone 12 系列的採用，以及 AR/VR 技術的發展，dToF 有望成為智能手機攝像頭的下一個風口。

目前的 LiDAR 於 IOS 作業系統以 IPad Pro 以及 IPhone 12 Pro 以及 IPhone 12 Pro Max 、 IPhone 13 Pro、IPhone 13 Pro Max、IPhone 14 Pro、IPhone 14 Pro Max 、 IPhone 15 Pro 及 IPhone 15 Pro Max 皆有此設備。Android 系統則有 Samsung Galaxy S10 S20 S21 Samsung S23 Ultra.，Samsung S23+，Samsung S23。

一、 dToF 開啟深度信息的新未來

3D sensing 是智能手機創新的趨勢之一，當前正加速向中低階手機滲透。目前實現 3D sensing 共有三種技術，分別至於 dToF 則是透過直接向測量物體發射雷射脈衝，並測量反射脈衝和發射器之間的時間間隔，得到光的飛行時間而直接計算待測物體的距離。而 dToF 和 iToF 的原理主要差別於發射和反射光的不同，dToF 相較於 iToF 來說製作困難度要高上不少，dToF 的困難點在於要檢測的光訊號是一個脈衝訊號，因此檢測器對於光的敏感度要求非常高，常見的 dToF 感測器接收端是使用單光子崩潰二極體 (SPAD)，或累崩式光電二極體 (APD)為雙目立體成像、結構光和 ToF，目前已經比較成熟的方案

是結構光和 ToF。其中結構光方案最為成熟，已經大規模應用於工業 3D 視覺，ToF 則憑藉自身優勢成為在移動端較被看好的方案。

ToF 的多場景應用呈現出了比結構光更為廣闊的發展前景。作用距離的劣勢限制結構光的應用，ToF 技術則彌補了距離上的缺陷，可以被應用於包含 3D 人臉識別、3D 建模以及手勢識別、體感遊戲、AR/VR 在內的更多場景中，能夠為智能手機帶來更娛樂性和實用性的體驗。此外，相比結構光技術，ToF 的模組複雜度低，堆疊簡單，可以做到非常小巧且堅固耐用，在屏佔比不斷提高的外觀趨勢下，更得到手機廠商的青睞。

在今年蘋果新 IPad Pro 率先採用了基於 dToF 技術的“雷達掃描儀”之後，也引發了業界關於 dToF 和 iToF 兩種 ToF 技術的關注。
ToF（Time of Flight），通過測量發射光與反射光的飛行時間計算出光源與物體之間的距離，本質上是時間維度測量。根據測距的方式不同，目前存在兩種 ToF 技術路線：iToF（間接飛行時間，indirect-ToF）和 dToF（直接飛行時間，direct-ToF）。dToF 直接測量飛行時間，原理是通過直接向測量物體發射光脈衝，並測量反射光脈沖和發射光脈沖之間的時間間隔，得到光的飛行時間，從而直接計算待測物體的深度。iToF 則是通過發射特定頻率的調製光，檢測反射調製光和發射的調製光之間的相位差，測量飛行時間。

iToF 間接測量飛行時間，具備低成本、較高分辨率優勢，適用於短距離測距。iToF 原理為把發射的光調製成一定頻率的周期型信號，測量該發射信號與到達被測量物反射回接收端時的相位差，間接計算出飛行時間。由於 iToF sensor 的 pixel 相對較小，可實現相對高圖像分辨率。但 iToF 問題在於的測距精度的實現限制了最大測距距離，從原理上看，調製頻率越高則測距精度越好，高調製頻率意味著對應

至於 dToF 則是透過直接向測量物體發射雷射脈衝,並測量反射脈衝和發射器之間的時間間隔,得到光的飛行時間而直接計算待測物體的距離。而 dToF 和 iToF 的原理主要差別於發射和反射光的不同，dToF 相較於 iToF 來說製作困難度要高上不少,dToF 的困難點在於要檢測的光訊號是一個脈衝訊號,因此檢測器對於光的敏感度要求非常高，常見的 dToF 感測器接收端是使用單光子崩潰二極體 (SPAD)，或累崩式光電二極體 (APD)的測距距離不能太大，並且環境光會對電路產生干擾。因此目前 iToF 主要應用在手機面部識別、手勢識別等測距距離較短的場景中。

iToF 傳感器電路相對簡單，難點主要在深度算法，安卓陣營自 2018 年引入 iToF 並推動其主流化。目前如三星、華為、OPPO、vivo 等品牌均有在中高端機型中配臵，除此之外，iToF 在物體識別，3D 重建以及行為分析等應用場景中能夠重現場景中更多的細節信息,因此還被廣泛應用於機器人、新零售等領域。

dToF 直接測量飛行時間,具備低功耗、抗干擾等優勢，適用於對測距精度要求高的較遠距離測距場景。dToF 原理為向被測物體發射光脈衝,通過對反射和發射光脈衝時間間隔的測量，直接計算待測物體的深度。測距原理使得 dTOF 測量精度不會因距離增大而降低,功耗更低同時對環境光的抗干擾能力更強。

dToF 深度算法相對簡單,難點在於用以實現較高精度的 SPAD。dToF 要檢測光脈衝信號(納秒甚至皮秒級),因而對光的敏感度要求會很高,因此接收端通常選擇 SPAD(單光子雪崩二極管)或者 APD(雪崩光電二極管)這類傳感器來實現,集成度弱於普通的 CMOS 圖像傳感器,像素尺寸一般大於 10μm,從而分辨率通常較差,成本更高。SPAD 是 dTOF 技術的核心,技術難度大且製作工藝複雜,目前

世界上極少廠家具備量產能力，集成難度很高難以小型化應用在手機等小型消費電子上，因而除傳統熱門應用領域車載 LiDAR 之外，消費電子領域目前僅有蘋果一家實現商用（IPad Pro 首次搭載）。

未來 TOF 會向更高集成度、更小的傳感器尺寸、更高分辨率發展。目前傳統的 CIS 單像素尺寸最小可達到 0.7μm，而目前 0.6μm 也已經在研發中。但 ToF 傳感器更要求單像素獲取信號的至於 dToF 則是透過直接向測量物體發射雷射脈衝，並測量反射脈衝和發射器之間的時間間隔，得到光的飛行時間而直接計算待測物體的距離。而 dToF 和 iToF 的原理主要差別於發射和反射光的不同，dToF 相較於 iToF 來說製作困難度要高上不少，dToF 的困難點在於要檢測的光訊號是一個脈衝訊號，因此檢測器對於光的敏感度要求非常高，常見的 dToF 感測器接收端是使用單光子崩潰二極體 (SPAD)，或累崩式光電二極體 (APD)能力，因而需要更大的單像素尺寸；dToF 傳感器電路設計比較複雜，需佔據較大的片上尺寸；iTOF 像素尺寸則需暫時讓步於更高的集光效率。種種原因使得 ToF 圖像傳感器的小型化存在一定困難。

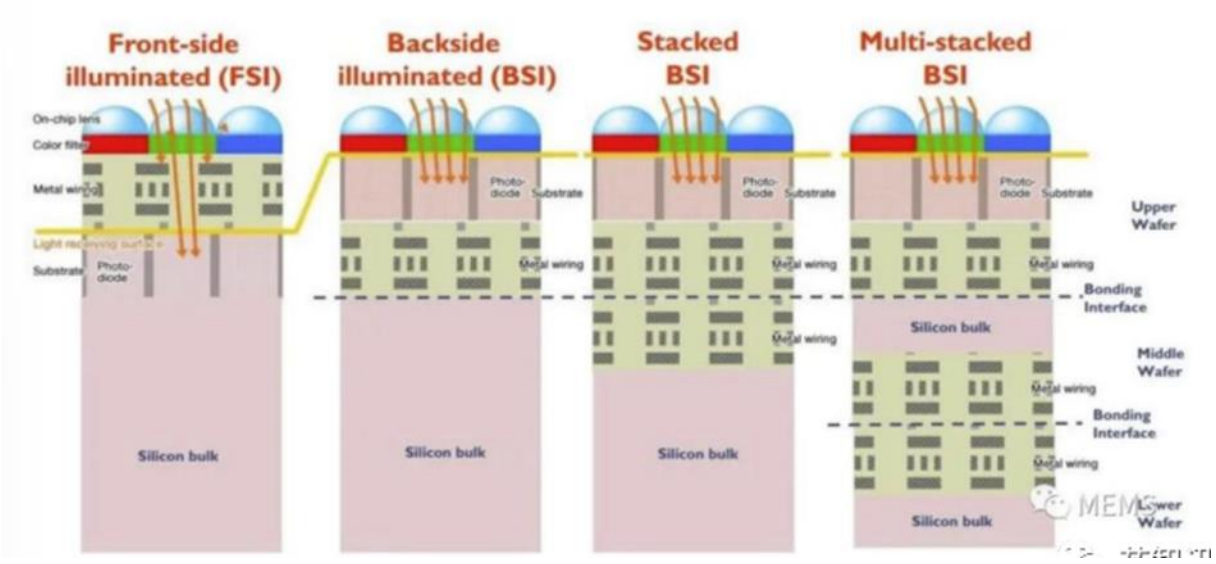


圖 2- 11 ToF 圖像傳感器

半導體工藝改進將有望實現 TOF 傳感器小型化。ToF 傳感器廠商通過半導體工藝方案的改進，如背照式（BSI）、堆棧式（Stacked）CMOS 等技術，將原本位於光電二極管上方的佈線層移至下方，以及將光電轉換器、電子倍增器（electron multipier）這些部分垂直堆疊，增大像素開口率，同時減小像素尺寸。目前根據松下最新的研究成果，dToF 傳感器也可以用 CMOS 工藝實現，集成度已經在數量級上逼近 iToF 方案。

目前 ToF 技術低分辨率的固有缺陷仍然存在，未來有望隨技術更迭而實現突破。目前 ToF 測量精度量級仍然相較結構光方案落後，但近兩年其傳感器分辨率已經在提升。iToF 方面，英飛凌面向消費市場的一般 REAL3™傳感器（iToF）也達到了 3.8 萬像素，2019 年推出的 IRS2771C 則達到 15 萬像素；dToF 方面，例如 IPad Pro 2020 的 LiDAR 分辨率達到了 3 萬像素；另外 TDC 電路設計進步也逐步提升著 CMOS 電路中的 TDC 時間分辨率精度，有望帶來 dToF 的分辨率的提升。

二、 ToF 未來最有潛力的應用在 AR 領域

目前手機是 ToF 在消費電子中的主要應用領域，隨著市場對 3D 視覺與識別技術的興趣日益濃厚，頭部終端廠商推動 TOF 技術在 3D 感知和成像方向上不斷拓展，我們看到 TOF 技術在智能手機端加速滲透，TOF 的使用進一步豐富著 3D sensing 的應用場景。伴隨蘋果 IPhone 12 系列的採用，以及 AR/VR 技術的發展，ToF 有望成為智能手機攝像頭的下一個風口。

ToF 助力消費級 AR 普及。ToF 技術的應用亦是 AR、VR 時代的催化劑。考慮到 ToF 的兩個獨特的優點—作用距離長、刷新率高，存在遠距離 3D 測距需求的 AR/VR 是最能體現 TOF 優勢的功能之

一。3D 攝像頭技術提供的手勢識別功能將成為未來 AR/VR 領域的核心交互手段。目前各大廠商推出的 VR 設備大都需要控制器，遊戲控制器的優勢在於控制反饋及時、組合狀態多。

根據 Markets and Markets，2019 年全球 AR 市場規模達到 107 億美元，預計到 2024 年將達到 727 億美元，複合增長率達 46.6%。過去幾年中，以 Facebook、英特爾、高通和三星為代表的公司在 AR 領域進行了大量投資，推動了全球 AR 市場的快速增長。中國 AR 市場規模預計在 2024 年將達到約 59 億美元，從下游應用來看，工業應用佔比最大，約佔 42%，其次是汽車（18%），零售（15%）以及航空與國防（10%）等。

AR 室內設計。2020 款 IPad Pro 使用了 dToF LiDAR 技術，通過這一技術可以獲得 3D 空間的深度信息，建立詳細的室內環境空間數據，模擬出擺放了新家具後的情況。宜家的 IKEA Place 應用，利用 AR 讓家居產品的外觀和在家中的擺放效果直接呈現在用戶眼前。醫療學習。Complete Anatomy 是一款教醫學院學生通過虛擬技術了解心臟、實時肌肉運動、神經系統等人體結構的軟件，在 2020 款 IPad Pro 上可以使用這一軟件，它將幫助專業人士更準確的評估病人的身體運動情況，為未來醫學發展帶來更多可能性。

3D 攝像頭技術提供的手勢識別功能將成為未來 AR/VR 領域的核心交互手段。目前各大廠商推出的 VR 設備大都需要控制器，遊戲控制器的優勢在於控制反饋及時、組合狀態多。HoloLens 為例，就擁有一組四個環境感知攝像頭和一個深度攝像頭，環境感知攝像頭用於人腦追踪，深度攝像頭用於輔助手勢識別並進行環境的三維重構。

拍照虛化 ToF 具備更好的景深信息採集功能，加入智能手機後攝模組後，能夠實現快速、遠距離獲取更高精度的深度圖（depth map），

從而完成較結構光範圍更大的 3D 建模，而且由於自帶紅外光源，其在暗光環境下獲得的景深信息同樣準確。因此，有 TOF 攝像頭參與的成像在虛化效果上會更加真實，富有層次。華為 2019 年發布的旗艦機 P30 Pro 在後路 3D 成像與感知模組中加入 ToF 鏡頭輔助，ToF 鏡頭獲取的更多景深信息加強背景虛化功能，相比雙目視覺更加精準，使得得到的圖像虛化邊緣更加清晰、更具表現力。

手勢識別。目前不少手機具備的懸浮手勢識別功能，不用直接接觸手機屏幕，僅藉由前路 ToF 的對手勢的 3D 感知，通過如在手機前揮揮手這樣簡單的操作來實現翻頁、滾屏等普通操作。體感遊戲相比前者更具交互性，通過 TOF 技術能夠採集到被拍攝人的身體深度信息，捕捉和採集身體的動作，進行手勢判定，控制預製的 3D 建模人偶的形象和動作，實現真人和 3D 虛擬形象跟隨，用身體、動作和手勢做遊戲交互。

ToF 技術的應用是 AR、VR 時代的催化劑。考慮到 ToF 的兩個獨特的優點—作用距離長、刷新率高，存在遠距離 3D 測距需求的 AR/VR 是最能體現 TOF 優勢的功能之一。3D 攝像頭技術提供的手勢識別功能將成為未來 AR/VR 領域的核心交互手段。

dTOF 技術的應用有望推動 AR 內容的完善，加速消費級 AR 普及。蘋果 2017 年便針對開發者們發布了用於 iOS 設備上 AR 應用開發的 ARKit 開發工具，2020 年發布的 IPad Pro 為消費電子設備首次搭載 dToF 模組，可視為蘋果針對 5G 時代 AR 領域的進一步佈局。

此前 IPad Pro 搭載的 LiDAR（激光雷達掃描儀），採用 Sony 3 萬像素 10μm dTOF 圖像傳感器，SPAD 陣列的探測器，並集成了 Lumentum 的 VCSEL 芯片和 TI 的 VCSEL 驅動芯片，能達到 ps 級

時間分辨率，可實現 5 米範圍內的 3D 感知與成像，具備更快的 AR 建模速度、更高的測量精度和更少的抖動、錯位。

Sony 的 dTOF 方案首次採用 3D 堆疊工藝，像素內連接通過混合鍵合互連技術將探測器晶圓和邏輯電路晶圓鍵合實現，同時，深溝槽隔離（Deep trench isolation）也被應用，充滿金屬的溝槽完全隔離了像素。從而有效控制了 dTOF 傳感器的尺寸，使其成功的應用在 IPad 這類小型消費電子設備中。

目前 IPad Pro 的 LiDAR 共呈現出三種典型場景的應用。AR 測量、AR 遊戲和 AR 裝修設計。AR 測量：LiDAR 可以快速計算人的身高，並展現垂直和邊緣引導線。通過開發者開發的 app 可實現對物體尺寸、建築物更精細的測量。

AR 遊戲：LiDAR 通過對周圍真實環境的掃描和快速獲得深度信息能力，為 AR 遊戲開闢了更廣闊的設計空間。如官網展示的《熾熱熔岩(Hot Lava)》電子遊戲，可以把客廳變成一個虛擬的熔岩環境，遊戲中的玩家可以跳到家具上以此來避開模擬中的地板熔岩。IPad Pro 上市後帶動開發者不斷豐富 iOS 平台上 AR 遊戲內容，也使一些原有的 AR 遊戲因為玩法升級而更具有生命力。

AR 裝修：iOS 上的 Shapr3D app，借助 LiDAR 對房間進行掃描創建 3D 模型，用戶可以對該模型展開編輯或添加新對象，使用 AR 可以查看實際房間在編輯後的虛擬效果，幫助用戶在裝修動工前更真切體驗設計效果。宜家 Place 應用同樣可以通過掃描一個房間獲得與之匹配的家具推薦，然後使用 AR 查看家具擺放效果。

dTOF 在 IPad Pro 上的應用，可以視為蘋果打通 AR 生態硬件基礎的第一步。未來蘋果通過技術改進和突破，有望將 dTOF 引入手機端以及更多地 AR 設備，促進 AR 硬件設備的發展同時，也激發設計

師基於 dTOF 的特性開發如建築、教育、醫療等更多場景的 AR 內容應用，推動 AR 應用生態持續完善。華為河圖（Cyberverse）定義地球級 XR 應用（包括 VR、AR、MR 等擴展現實技術），將 AR 應用拓展到更廣闊的數字世界。華為河圖（Cyberverse）被定義用來提供地球級的虛擬現實融合服務的數字平台，華為 AR 地圖是其推出的第一個商業產品，主要功能包括 AR 實景導航、全息信息展示、虛實融合拍照及其他虛擬活動等。全場景空間計算能力是河圖的核心，這一能力所需的宏觀地圖可以使用衛星定位，而室內及一些微觀場所的建模定位則依賴智能手機的 3D Sensing 來完成。目前華為 P40 系列機型已經能夠支持華為 AR 地圖。下一波移動終端創新將圍繞 AR 進行革命性創新。AR/VR 開發平台的搭建和完善，及增強現實內容市場的蓬勃發展，必然會推動 TOF 產業的發展。TOF 有望接力結構光，從生物感知到虛擬現實，從人臉識別到 3D 建模，帶來產業端升級和用戶體驗優化，前路人臉識別加後路虛擬現實功能可能成為手機的下一個形態。伴隨 AR/VR 的發展，ToF 有望成為 5G 時代智能手機攝像頭的下一個風口。

三、 下一波創新性革命，TOF 市場空間巨大

下一波移動終端創新將圍繞 AR 進行革命性創新。隨著增強現實內容市場的蓬勃發展，內容廠商不斷推動 AR/VR 開發平台的發展，必然會推動 TOF 產業的發展。TOF 有望接力結構光，從生物感知到虛擬現實，從人臉識別到 3D 建模，帶來產業端升級和用戶體驗優化，前路人臉識別+後路虛擬現實功能可能成為手機的下一個形態。伴隨 AR/VR 的發展，ToF 有望成為智能手機攝像頭的下一個風口。

四、 BOM 比較：TOF 或更具成本優勢

預計 ToF 和結構光的 BOM 成本大約為 12~15 美元和 20 美元，相比之下 TOF 更具有成本優勢。以 IPhone X 為例，結構光技術的解決方案包括三個子模塊（點投影儀，近紅外攝像機和泛光照明器+接近傳感器），而 ToF 解決方案則將三個集成到一個模塊中，可以將包裝成本降低。

五、 深度解析 3D Sensing 攝像頭產業鏈

目前 TOF 或結構光的 3D 感知技術均為主動感知，因此 3D 攝像頭產業鏈與傳統攝像頭產業鏈相比主要新增加紅外光源、紅外傳感器和光學組件等部分。通過對已經上市的主流 3D 攝像頭產品進行拆解分析，3D 攝像頭產業鏈可以被分為：1、上游：紅外傳感器、紅外光源、光學組件、光學鏡頭以及 CMOS 圖像傳感器；2、中游：傳感器模組、攝像頭模組、光源代工、光源檢測以及圖像算法；3、下游：終端廠商以及應用。TOF 和結構光二者雖然原理不同，但其所需要的核心部件基本相同，TOF 中的核心部件包括發射端的 VCSEL 光源、Diffuser 等，接收端的鏡頭、窄帶濾光片、近紅外 CMOS 等。

第三節 LiDAR 應用

LiDAR 是用來進行周遭環境的掃描，那具體會運用在哪些地方呢？其中包含了目前很多的電動車廠，在開發自動駕駛技術的時候，都會在車外裝有 LiDAR 感應器，利用 LiDAR 發出的光束偵測車輛與其他物體間的距離，避免任何與人、其他車輛、物品、建築之間的碰撞；LiDAR 也會被安裝在飛機上，從高處進行地球表面、地形特徵的繪製。例如，在氣象學中，LiDAR 就被用來研究雲的分佈，研究大氣中污染物的濃度，氣象學上的應用也是 LiDAR 最早被運用到的地方；在考古學中也會利用 LiDAR 對考古遺址和物體進行非侵入式

探索和檢視。

LiDAR 是 Light Detection And Ranging（雷射探測與測距）的縮寫，是使用近紅外光、可見光或紫外光照射物件，並透過光學感測器捕獲其反射光來測量距離的遙測(使用感測器從遠處進行感測)方法。也被稱為 Laser Imaging Detection And Ranging（雷射成像偵測與測距）”，通常以脈衝狀近紅外雷射照射對象物，測量光線到達對象物並反射回來的時間差。

LiDAR 的特點在於它不僅可以準確地偵測到達物件的距離，還可以準確地偵測位置和形狀。

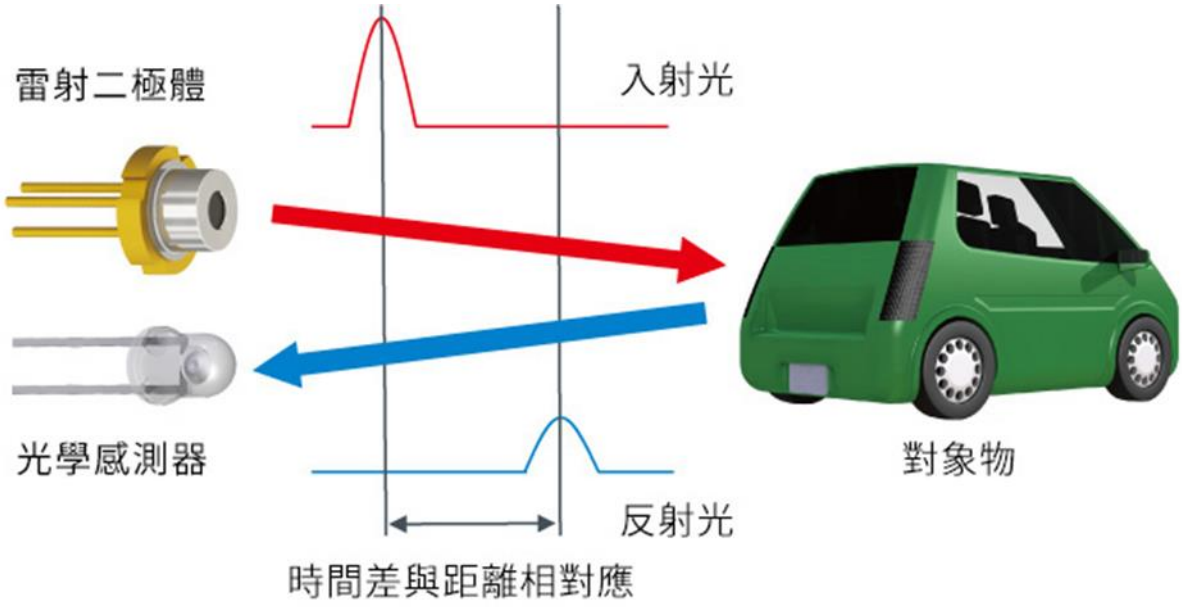


圖 2-12 LiDAR 示意圖

一、 光學雷達的首次應用

LiDAR 的概念於 1930 年首次被發現，用於使用探照燈，感光紙和望遠鏡頭估計雲的距離和密度。基於這一概念，LiDAR 技術的第一個原型是在 1961 年休斯飛機公司發明雷射器後不久出現的。最初的目的是用它來跟蹤衛星，並測量空氣中的雲和污染。當美國的太空計劃在 1971 年阿波羅 15 號任務期間使用該技術繪製月球表面地圖時，

這項技術得到了普及。

從那時起，它已被用於許多行業的眾多應用中。美國宇航局繼續使用光學雷達進行地球地形測繪和研究氣候變化。地質學家使用它來創建海岸線地圖或製作數位高程模型。考古學家用它來創建用於測量的高解析度地圖。它甚至被用於娛樂業，以 3D 形式創建建築物和城市的掃描以進行製作。你甚至可能在口袋裡有 LiDAR。最新的 IPhone 有一個微小的 LiDAR 感測器，用於增強現實應用 Apps。

SICK 自己的創始人 Erwin Sick 博士首次用於工業應用，他使用輕型或輕型測距來確保機械安全。他的目標是找到利用技術使人們的工作更安全，讓世界變得更美好的方法。從那時起，該技術被用於許多製造和工業環境，包括機器安全和機器人技術。

二、 利用光學雷達技術進行數據處理的演進

過去，大部分數據被發送到控制器，控制器將解析數據並使用該數據來採取行動。這是一個複雜的過程，許多人沒有資源，也沒有看到開展這樣一個專案的價值。然而，多年來，我們為 LiDAR 添加了更多的工具和功能，使該技術更易於使用，這使我們能夠從製造過程中獲取非常有價值的數據。如今，我們的許多 LiDAR 產品都帶有內建的實用設置程式，使設置變得簡單直觀。

LiDAR 傳感器只是複雜過程的一部分。為了收集構建準確反映地形及其地形的點雲所需的數據，LiDAR 結合了其他高精度系統：衛星定位（GNSS 數據）和慣性測量單元 (IMU)。 借助一點軟件魔法，LiDAR 飛行可用於構建 3D 點雲和強度圖，這兩者都需要大量技能來解釋，但在採礦、林業、農業和建築作業中提供寶貴的數據。

三、 激光雷達的優點

使用 LiDAR 進行地圖繪製的最被引用的積極因素是該技術的準確性。但作為一個獨立的聲明，並沒有給我們太多的工作。

首先，重要的是要考慮準確性對您和您的項目意味著什麼。您是優先考慮相對精度還是絕對精度？換句話說，您是否擔心您的最終產品在其相互關係的特徵方面或其特徵與其在世界上的位置方面是否準確？

LiDAR 是追求絕對精度的方法，通常是當目標是逼真的裸地模型時的最佳選擇。這是因為它是考慮海拔、植被和手頭條件的最佳方法。

LiDAR 與 GNSS 數據的集成以及它是直接測量的事實 – 從上方發射數千個激光脈衝 – 確保您的最終數字地形圖具有極高的垂直精度。

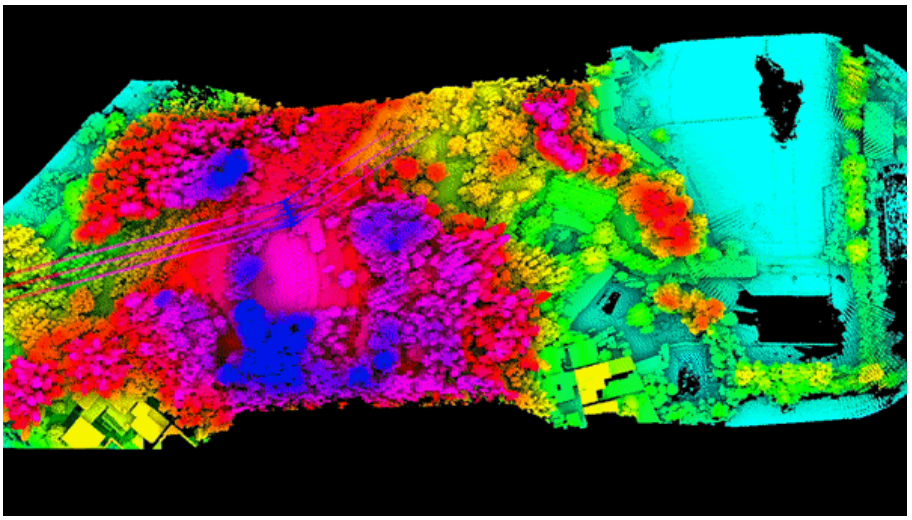


圖 2-13 地面數據示意圖

地形複雜性不僅以地形起伏的形式出現。植被還可以阻止基於照片的測量方法獲取精細的地面數據。

LiDAR 的光脈衝穿透樹葉和樹枝之間的縫隙，到達下面的地面

並提高測量的準確性。

如果您的工作場所的光照條件不一致，LiDAR 也是首選。如果您想執行夜間調查或低能見度任務，LiDAR 可以在不需要外部光源的情況下完成任務。 最後，LiDAR 允許您捕捉直徑較小的細節。電源線就是一個很好的例子。得益於高密度點採樣和直接測量方法，您可以使用 LiDAR 準確繪製電纜懸鏈線。



圖 2- 14 繪製電纜懸鏈線

四、 激光雷達的缺點

使用 LiDAR 帶來的最明顯挑戰是其成本。由於操作複雜度更高（並且需要更複雜的組件和傳感器），您可以輕鬆地花費數十萬美元購買完整的調查解決方案。

這種複雜性還擴大了您出錯的空間，並增加了對經驗豐富的專業人員的依賴。由於多個傳感器和信息在沒有大量處理的情況下不易訪問，因此提取所需的數據並不簡單。

同樣重要的是要記住，傳統上 LiDAR 傳感器比簡單的相機更笨重。隨著無人機在航測中越來越受歡迎，需要更大的無人機來處理更

重的有效載荷，這可能會增加已經很可觀的費用。

選擇 LiDAR 的最後一個缺點可以說是它最大的優勢：事實上，它是在非常特定的情況下完成工作的最佳工具。對於許多應用，常規攝影測量就足夠了。隨著圖像處理軟件的改進，這種趨勢正在積聚動力。

第四節 攝影測量

簡而言之，攝影測量是一種使用照片測量距離的方法。這些照片使用專業軟件進行處理，以生成準確而逼真的世界模型。

正射鑲嵌地圖和 3D 模型具有多種應用，從施工規劃和正在進行的項目管理到營銷材料。

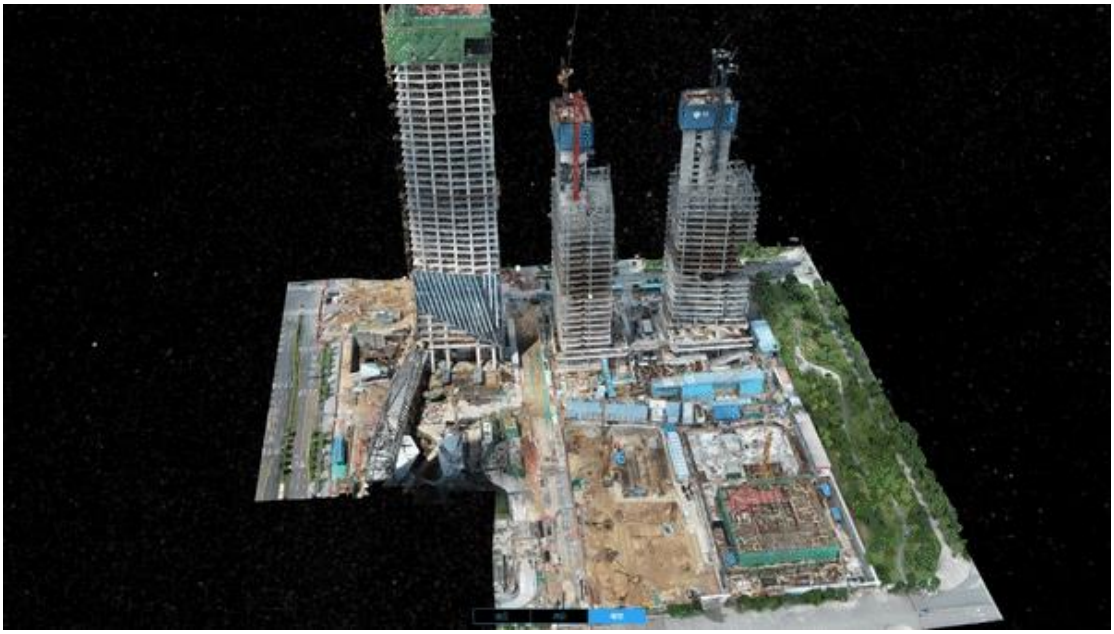


圖 2- 15 攝影測量呈現

有效攝影測量所需的圖像數量從數百到數千不等。這完全取決於相關站點的大小以及您想要達到的深度和準確性。

無人機飛行員必須確定最佳飛行高度才能獲得所需的地面採樣距離。您還必須在每張圖片上設置重疊，以確保您的軟件可以將您的圖像無縫拼接在一起。

一、 攝影測量的優點

使用攝影測量的主要好處是它的可訪問性。無人機技術和測繪軟件的興起簡化了工作流程，並為任何擁有合適的攝像無人機的組織提供了準確的地圖和 3D 模型。

除了相機校準、基本飛行計劃和繪製地面控制點之外，執行測繪任務並將該數據轉化為有用的東西相對簡單。在建築、保護、採礦和農業等各行各業中，這一過程在無數種情況下會產生切實的結果。

重要的是，結果也是可以訪問的。具有可識別特徵和顏色的地圖和模型非常直觀，使它們成為一個很好的協作工具，利益相關者可以在不花費太多時間處理數據的情況下工作。



圖 2-16 地圖和 3D 模型

攝影測量的另一大吸引力在於它的價格實惠。正如我們所提到的，入門意味著在專業無人機上投資數千美元，而在處理數據所需的軟件上則要少得多。 最後，攝影測量提供了一種更靈活的方法。根據手頭的任務，您可以更好地控制任務速度、高度和準確性之間的權衡。

二、 攝影測量的缺點

基於攝影測量的測量方法有一些缺點。首先，地圖和模型的準確

性在很大程度上取決於無人機相機和無人機本身的質量。傳感器尺寸、光圈、分辨率和焦距都會影響地面採樣距離 (GSD) 以及飛行高度。最重要的是，如果沒有幾個使用地面控制點或啟用 RTK 或 PPK 的無人機，您將難以產生絕對準確的結果。



圖 2-17 無人機相機

攝影測量抱負面臨的第二個挑戰是天氣。或者，更具體地說，是光照條件。黑暗、雲層、灰塵等都會對測量結果的質量產生負面影響。而數據處理，只能衡量能看清楚的東西。這意味著能見度有限的飛行——無論是由於植被、陰影還是一天中的時間——將產生更少的地麵點和不太準確的地圖和模型。

三、 何時選擇激光雷達

如果您要繪製植被覆蓋率高的複雜地形，建議使用 LiDAR。由於其直接測量可以穿透樹葉、樹枝和樹木，您可以使用結果數據構建準確的地形點雲。 該技術還非常適合精確測量電纜等物體，這些物體通常太細而無法通過任何其他方法識別。如果手頭的測量任務要求精度高於一切，LiDAR 也應該是您的首選方法。儘管這並非沒有挑戰，這些挑戰以成本和使數據栩栩如生所需的專業知識的形式出現。



圖 2-18 無人飛行載具搭載 LiDAR

選擇 LiDAR 用於：

1.繪製難以進入、複雜和雜草叢生的地形

2.捕捉薄結構的細節，例如電源線或屋頂邊緣

3.注重細節和精確度的項目

四、何時選擇攝影測量

攝影測量的經濟性使其成為那些不熟悉無人機測量的人的首選。儘管比 LiDAR 便宜並不是它唯一的好處。

事實上，許多應用程序最好堅持使用攝影測量。當您想要使用正射鑲嵌地圖制定計劃、使用 3D 模型進行協作或以相對較低的成本提供可訪問的項目進度更新時，尤其如此。



圖 2- 19 正射地圖示意圖

選擇攝影測量：

1.可訪問且需要最少的後處理和專業知識的上下文豐富的掃描

2.未經訓練的眼睛易於理解的地圖和模型

3.需要視覺評估的數據集

五、激光雷達與攝影測量比較

LiDAR 製作的真彩點雲一樣，這裡的答案並不像黑白那麼簡單。與攝影測量相比，LiDAR 傾向於生成具有更高細節和準確性的掃描。另外，因為它可以在環境挑戰下運行良好 – 想想弱光或大量植被 – 它非常適合您將準確性放在首位的場景。

LiDAR 點雲可以非常精細，每平方米多達 500 個點，垂直高度精度低於 3 厘米。數據點的高密度帶來了更強大的數據集，這反過來在處理發現時為您提供了更多的多功能性。 這並不是說攝影測量本質上是不准確的。如果您的地形相對簡單且沒有茂密的植被，您仍然可以構建非常詳細的地圖和模型–特別是如果您還使用 RTK 定位模塊。

五、 激光雷達與攝影測量數據

LiDAR 和攝影測量是收集數據的根本不同的方法。使用 LiDAR，您最終會得到數千個數據點，這些數據點形成一個 3D 點雲，勾勒出相關地形。您需要合併來自不同數據集的顏色，以將其轉換為視覺上可訪問的內容。

使用攝影測量，您最終需要處理成百上千的圖像並將其拼接在一起以產生有價值的東西：3D 點雲、地圖或可導航模型。 基於雲的 LiDAR 處理不像基於雲的攝影測量軟件那樣流行或易於訪問。這意味著您必須有一名現場專家，他可以將原始數據與正確的軟件一起轉化為可操作的內容。

六、 光學雷達的種類

自幾十年前發明以來，已經為各種工業應用創建了多種類型的LiDAR。以下是三種常見類型。

(一)感測器雷達

這種類型的 LiDAR 採用緊湊輕便的雷射掃描器的形式。這些被認為是入門級技術，因為它們通常用於簡單的區域監控任務。借助 SICK 的高解析距離測量 （HDDM） 技術，感測器化 LiDAR 產品即使在高環境光下也能正常運行。這降低了 LiDAR 檢測的成本和複雜性。

這種類型的 LiDAR 用於一些自動駕駛汽車應用，但它也越來越多地用於工廠車間的基本應用。LiDAR 感測器可創建一個不可見的偵測平面，並且可以檢測任何物體入侵此平面 – 例如可能是一個滿溢出的物流箱，或分揀機上的超寬超高物體。這在物流和生產環境中特別實用。

在揀箱應用中，也可以使用感測器化的 LiDAR。這使得製造商能夠監控產品的生產並確保品質控制。如果操作員伸手進入不正確的箱體，系統將向操作員發出信號。在以往，這通常是用多個光幕完成的，但是現在只需要單個 LiDAR，設備安裝和佈線要簡單得多。



圖 2-20 感測器雷達

(二) 多層光學雷達

有些人稱之為 3D LiDAR，而另一些人則將其稱為多層或多 Channel。這種類型的 LiDAR 不僅提供像 2D LiDAR 這樣的單個平面，還提供另外多個額外量測的平面。這可用於遠距離檢測物體。

額外的平面增加了 2D LiDAR 所缺乏的垂直量測層。例如，如果一個物體沒有與平面正確對齊，另一個平面還是會偵測到。這提供了更大的靈活性，因此，如果物體沒有完全對齊或 100%始終處於完全相同的位置，多層感測器則適用此情境。

使用多層 LiDAR 的一個常見原因是檢測包裝線中的棧板懸凸物件。或者，它可用於掃描棧板，以查找不應存在的任何物體。它可以確保棧板沒有物體凸出或懸掛在外，造成被設備穿刺或勾拉或任何會弄亂生產線的東西所困擾。甚至，它還可以利用其三維的測量數據判斷並定位棧板孔位，讓無人載具能夠精準移載棧板。

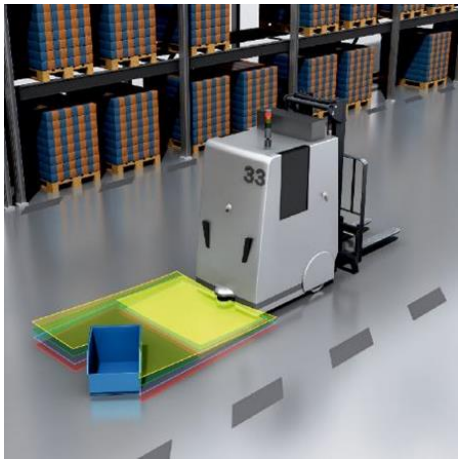


圖 2-21 多層光學雷達

(三) 固態光學雷達

還有另一種類型的 LiDAR 是固態型。這種類型的 LiDAR 不像前兩個那樣是單個平面或多個平面，而是提供了它所看到的一切的視野。使用這項技術，可以像相機一般僅靠單次拍攝取得圖像，並提供與該

圖像的每個「像素」的深度或距離。

這種類型的 LiDAR 可用於許多 AMR 應用。例如，在箱體中隨機去放料件的應用中，LiDAR 可以提供箱中任何物件的 3D 圖像及座標，使機器人知道去何處拾取物件。

還有一個應用是棧板上的物件的尺寸測量。在棧板裝載中，通常使用機器人的吸力夾具收集多個紙箱並將其堆疊在棧板上。通過將 LiDAR 添加到機器手臂端上，機器人現在可以確定紙箱的位置和尺寸，以便它可以動態調整其抓力，以提高效率並減少錯誤。該 LiDAR 可快速安裝，可立即投入使用，只需一次即可瞬間提供可靠的高品質 3D 數據。

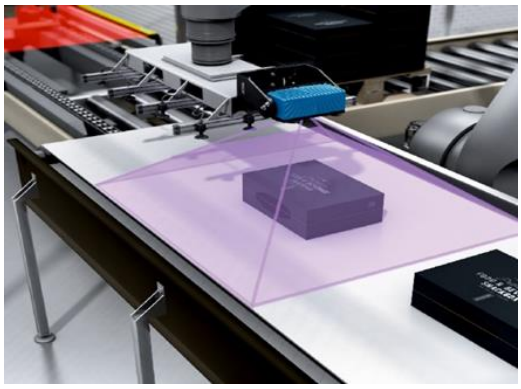


圖 2-22 固態光學雷達

七、 光學雷達的多功能性

LiDAR 技術可用於所有不同行業的許多不同應用。在工業環境中，LiDAR 技術已經發展到製造商能夠以我們從未想過的方式使用這項技術的程度。

由於新冠疫情肆虐影響下，人與人之間的社交距離管控以及場所人員管理變得非常重要，SICK 推出的 PeopleCounter 和 DistanceGuard 基於現有的 3D 和 2D LiDAR 感測器，透過 SICK AppSpace 生態系統開發而成，專用於上述任務，可以解決一般 CCTV 個資外洩風險的問

題，同時又能達到人流管控需求。



圖 2-23 社交距離感測

針對特殊應用，客戶也可以自行研發或者在開發者社區與的支援下與 SICK 的專家一起研發 SensorApp。正如您在此所見——這裏我們所述的 PeopleCounter 和 DistanceGuard 應用，就是基於 SICK AppSpace 而生。此外，LiDAR 衍生出來的解決方案不僅僅如此，尚有 AMR 專用 LiDAR 定位系統—— LiDAR-LOC，其提供 AMR 製造商可靠且穩定的定位能力，並支援 SICK 全系列 LiDAR，以因應各種自動化場景。

LiDAR 技術的應用，首先想到的是車用市場先進自動駕駛系統。據說該技術是實現全自動駕駛（Level 5）所不可或缺的技術。

八、 LiDAR 應用範例

該技術還被運用於高精度的人、物偵測，例如消費電子領域的掃地機器人和高爾夫測距儀，以及工控設備領域的自動搬運車（AGV）和服務機器人等。

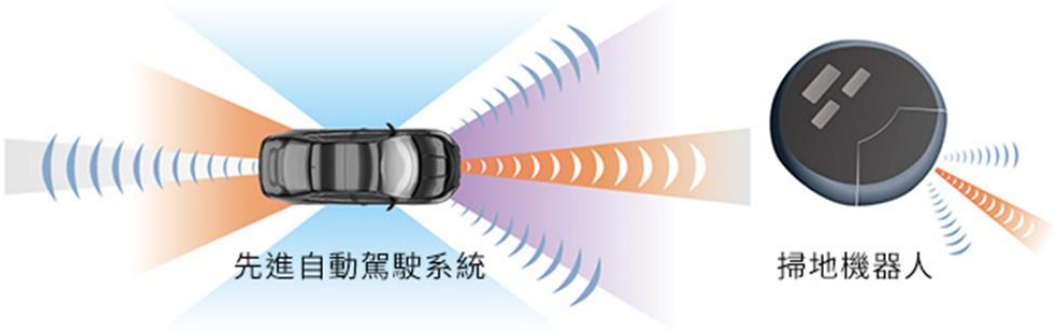


圖 2-24 應用範例

(一)先進自動駕駛系統

在 ADAS（先進駕駛輔助系統：例如自動剎車和車道維持輔助系統）中，融合了相機和毫米波雷達的系統成為主流。然而，一般認為要想實現自動駕駛，還需要加上 LiDAR 技術，並將這三種技術加以融合。可以說如果要想實現先進自動駕駛系統，需要截長補短地充分運用這三種技術，三者缺一不可。

表 2-1 光學偵測三種技術比對

	相機	毫米波雷達	LiDAR（雷射探測與測距）
方式	透過相機所拍攝到的圖像來進行識別	使用無線電波，透過測量電波到達物件並反射回來的時間差來測量距離和方向。	照射脈衝狀雷射光束，透過測量光線到達物件並反射回來的時間差，針對距離、位置和形狀進行三維測量。
優點	• 可以將拍攝到的圖像進行影像處理來進行識別	• 即使在夜間或惡劣天氣的情況下，也可以測量障礙物的方向和距離 • 比 LiDAR 便宜	• 高精度偵測距離、位置和形狀 • 透過向各個方向照射（漫射）雷射，可以捕獲更大範圍的狀況
缺點	• 難以準確偵測形狀和位置 • 不適合惡劣天氣、夜間（暗處）和逆光的情況	• 難以發現微小物體 • 難以偵測到諸如紙板等低反射率的物體	• 惡劣天候條件下的偵測能力會下降 • 與毫米波雷達相比價格昂貴

(二)LiDAR 用雷射二極體

要提高 LiDAR 的性能，實現“更長距離”和“更高空間解析度”的感測，作為感測光源的雷射二極體需具有更高輸出功率、更高效率以及更小的光束。早在 IPhone 12 發布前，經常針對 IPhone 爆料的 Jon Prosser 發布了一段影片，他在影片中聊到了一些可以利用 IPhone 上的 LiDAR 做哪些事情，例如利用 LiDAR 進行自動對焦。自動對焦這件事情看似再平凡不過，但事實上，在環境昏暗的情況下要做到自動對焦相當困難，但是因為 LiDAR 是利用光束去偵測物品的位置，所以即便在暗處也可以做到自動對焦，甚至在一般光源下，也能夠更快速更精準的對焦。

因此，對於喜歡用 人像模式 拍照的人而言，LiDAR 更是不可或缺的功能，他可以更精細的偵測到人像的邊緣，更準確提升人像模式景深效果。而加入 LiDAR 這項功能，或許也跟蘋果近年來不斷提昇相機的功能、拍照的品質有關，就像上面所說的，利用 LiDAR 確實可以讓 IPhone 的相機有更多的應用。

LiDAR 對於距離、環境的偵測以及繪製相當有用，因此對於未來 AR 環境的建構有相當大的幫助，例如 Apple 內建的「測距儀」App，就是 IPhone 利用 AR 的其中一個應用，加入了 LiDAR 後會讓測量更加精確；ikea 的 App 讓大家可以利用 AR 擺放虛擬的傢俱在畫面中，購買前更可以知道實際買回來後會是怎麼樣的感覺；3D Scanner 掃描 App 也是利用 LiDAR 繪製出空間的 3D 圖，未來在專業工作上，3D 模型、空間的製作上也會很方便，甚至利用 IPhone 掃描玩室內的 3D 圖以後，還可以輸出成 CAD 檔案，輸入電腦後繼續更進階的處理。

第三章 設備及方案說明

本研究首先透過 IPhone LiDAR 針對本校開放空間設施的掃描建構，並比對掃描速度、高度及環境背景(單一構造物、複合背景、植生及水面)等因素，對 IPhone LiDAR 成像及數值成果之差異，爾後再與傳統量測工具進行比較；第二步再將較為穩定的掃描操作方式運用在水土保持工程中常見的構造物，與傳統量測工具進行比對。

第一節 量測設備

本研究對比 IPhone LiDAR 所使用之常見量測工具包含：無人機（Unmanned Aerial Vehicle System）、RTK、全站儀圖(a)、(b)、(c)。



(a).全站儀



(b).無人機



(c).RTK

一、 無人機量測

遙控無人載具（Unmanned Aerial Vehicle System, 簡稱 UAV）大多利用其再訪率、高機動性與高解析度之區域，搭配外方空間資訊，獲得計畫範圍三維立體模型，並配合相關文件(如調查照片、工程圖、河道斷面資訊、歷史雨量資料等)提供整體性環境影像資訊。

在天然災害發生時，往往需要即時災區之基本資料，其中包含正射影像、大範圍傾斜拍攝及地表三維模型，供救災單位進行應用及決策使用。無人載具（UAV）設備可快速有效掌握潛在危險的區域之狀況，透過創新的航拍流程與新的測繪技術，能大幅提升航拍技術的效能，航拍工作流程如下所示：



圖 3-1 無人載具空拍工作流程圖

(一)設備說明：多軸無人載具(美製)

1. 最大航高約 500m(離地高)；滯空時間約 30 分鐘。
2. 最大巡航速度約 58 km/hr。
3. 最大抗風能力約蒲福風級 5 級風，具拍攝穩定控制。
4. 內建通訊裝置，最大可控制範圍約 3.5 km。
5. 具自返航功能，當電力不足或超出作業範圍時會自動返航。

6. 飛行控制 IMU 模組、GPS 模組、電壓電流偵測器、雙向數據機模組…等，皆隱藏於機身內部。

表 3-1 四軸旋翼型無人載具相關設備

性能諸元	元件外觀
1.無人載具系統 SKYDIO 2 最大外形尺寸: 22.3 x 27.3 x 7.4 重量: 775 公克 電池: 11.4V 4280mA LI-PO 電池。 可飛行時間: 約 23 分鐘。 內建通訊裝置，最大控制範圍 3.5 km。 產地:美國	
2.高解析度像機 感光元件: Sony IMX577（1 / 2.3 吋 CMOS） 鏡頭: 20mm f/2.8 有效畫素：1200 萬 影像大小：4056×3040 pixels 快門：1 秒~1/1920 秒 支援 4K 高畫質錄影	

(二) 無人飛行載具拍攝前置作業

完整的航拍任務，需根據拍攝目的進行相關前置準備作業，以提升空拍作業之執行效率。選擇晴朗無風的天氣進行拍攝作業，若因測區範圍較大(至少 3 平方公里以上)，若需分不同架次進行拍攝時，則每架次的拍攝天候環境應相仿，避免因天候不同所拍攝影像色調不一致，造成軟體自動匹配計算上的偏誤或建物模型成果外牆顏色差異過大並於飛行作業執行之前進行現地勘查作業，確定拍攝標的地上物可能影響飛行作業之電塔位置、電塔線路走向、電信基地台位置、山嶺線位置、遷急線及遷緩線位置等，將飛行安全以及飛行成果提升至最高層級如圖 3-2。

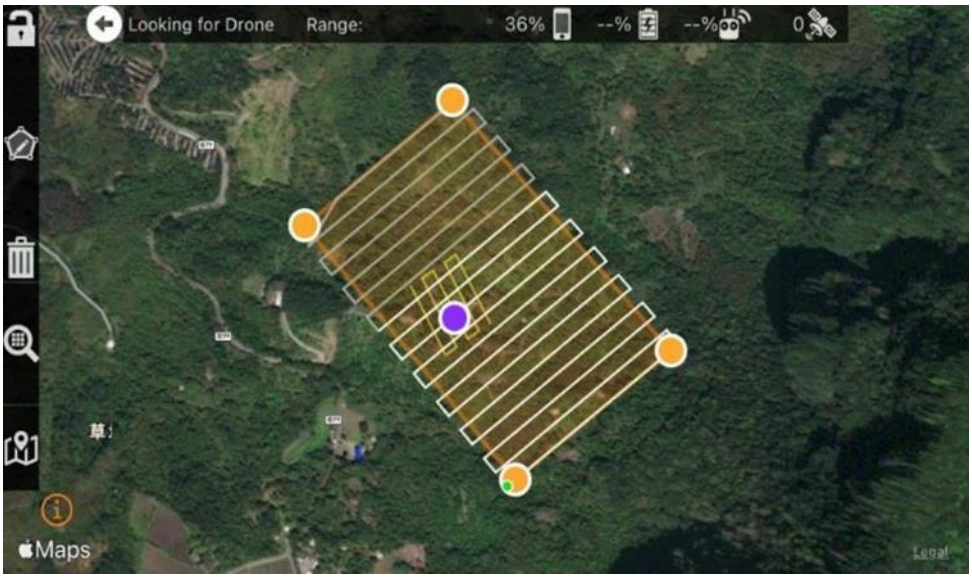


圖 3- 2 整體航拍規劃示意圖

(三) 無人飛行載具拍攝前置作業佈設固定/移動空標

為將本工項 UAV 影像拍攝作業產製之成果成效最大化，預計佈設空標型式如圖 3-3 所示，將拍攝成果與真實地表進行匹配校正，使拍攝成果能達到多期比對成效。佈設控制點時，為確保計畫範圍空間精度穩定，佈標形式以外圍佈設，佈標上大於 3 組以上，其為在進行平差計算時，有多餘觀測進行解算。



L 型空標型式



十字型空標型式

圖 5-3UAV 空標佈設型式

本計畫進行空中三角測量平差時的平面與高程地面控制點

（ground control point, GCPs），本計畫挑選較不易變動的道路標記地面控制點，其中點位做為製作地形及正射影像校正之地面控制點，其餘點位做為精度檢核用之檢核點，相關成果可用於比對分析地形變化差異量，以瞭解崩塌地是否持續滑動趨勢，進而提供後續劃分滑動土體範圍之依據。控制點位坐標以電子化全球衛星即時動態定位（RTK）系統 e-GPS 進行控制點量測，平面坐標系統採用 TWD97 坐標，高程坐標系統採用正高，布設過程及成果如圖 3-4 所示。



圖 3- 4 空標布設成果

本計畫區經控制點布設後，再進行控制點 e-GPS 測量，如圖 3-5 所示。經由 UAV 取得近垂直空拍影像匯入「Pix4D」航測影像處理軟體，產製之精度報表，計算分析之成果以平均誤差、標準偏差表示之。

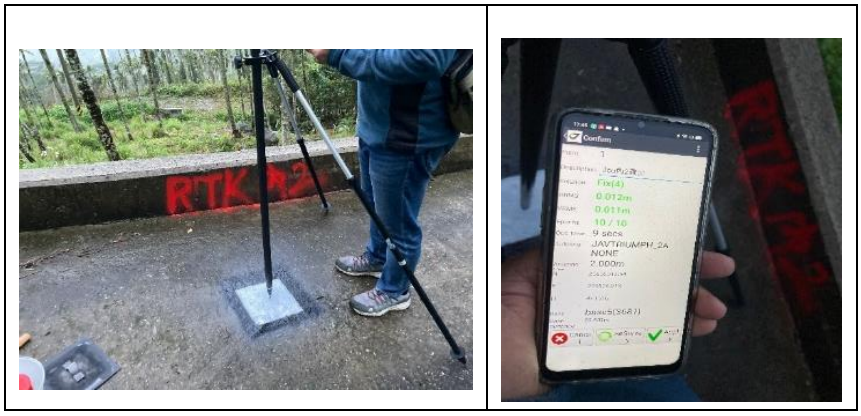


圖 3-5 控制點布設及控制點 e-GPS 測量

有效提昇空拍作業之精準度，須先行蒐集空拍地點環境基本資訊，

進行拍攝位置與範圍確認，工作內容包括空拍範圍確認、任務區天候因素調查、飛航管制確認、作業路徑與時間規劃等；作業流程如圖 3-6。

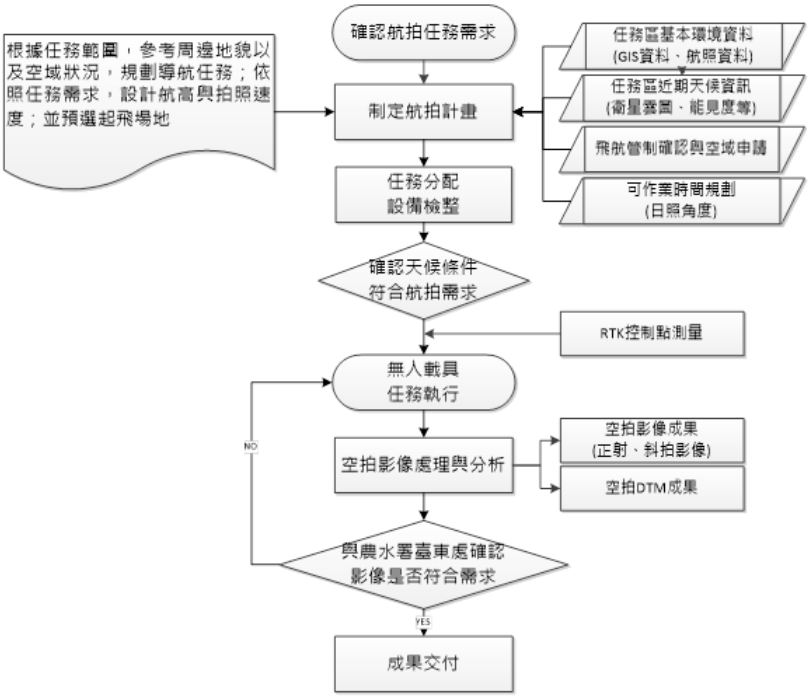


圖 3-6 無人載具空拍作業流程

(四)航線規劃與拍攝任務執行

在無人機航拍作業過程中，為能在大面積範圍內取得較佳的地面解析度影像，通常會採用航線規劃的方式，依照解析度的需求設定航高、航線重疊率等因子，航線規劃時需考慮相關的相關因素說明如下。

1. 航高設定

需依照酬載的感測器(如相機)，參酌其感光元件尺寸、焦距、像元尺寸與地面解析度需求，以決定飛航高度，決定後需再考量現地環境障礙物(如建物、山體等)調整最終的飛航高度(如圖 3-7)。

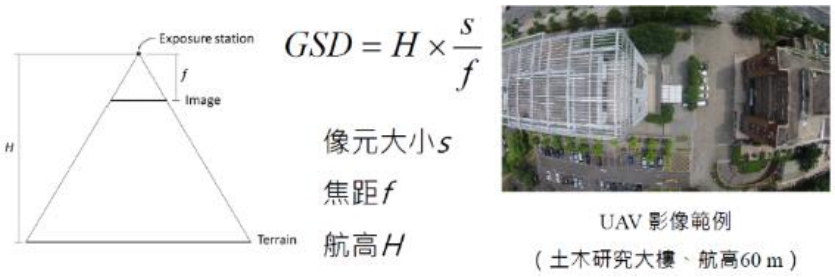


圖 3- 7 航高設定與地面解析度相關性

2. 拍攝任務執行(設定相機、航高與地面解析度)

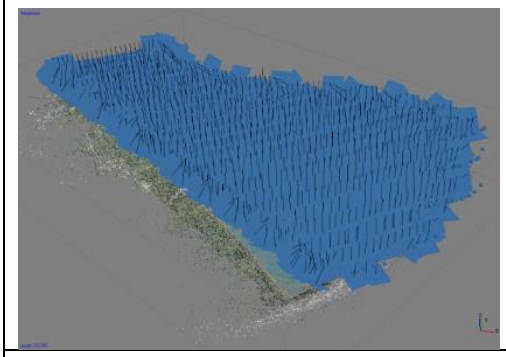
利用 Google Earth Pro 軟體了解拍攝範圍之地貌、地形、海拔高度等資訊，並預先評估以人力可及地點規劃起降點位置，以利現場空拍作業進行。

航拍完成之正射影像地面解析度為 4 公分，影像前後重疊率應達 80%以上，側向重疊率可達 70%以上，重疊率誤差應在 15%以內。

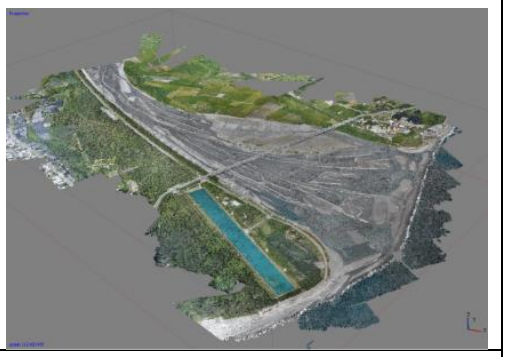
3. 航拍原始影像後處理

本計畫使用 PIX4D 電腦視覺(Computer Vision)應用軟體，電腦視覺技術運用數學運算重建影像中物件的三維位置與形狀(Szeliski, 2010)，一般來說 PIX4D 以三個步驟去重建影像中三維物件。第一先進行影像定位(photo alignment)，其運用 structure from motion(SFM)，Ullman, 1979)技術從一系列有重疊的二維影像，重建影像中物件的三維幾何位置與相機姿態(圖 3-8(a))。SFM 演算法首先偵測影像中特徵點(feature points)，並找出多幅影像中這些特徵點的變化(Fisher et al., 2005; Szeliski, 2010)。利用這些資訊便可估算出特徵點的位置，多個特徵點便構成離散的點雲(圖 3-8(b))(point cloud)。第二步驟利用多視角立體重建技術(multi-view stereo reconstruction)將定位後的影像建構更細緻的三維景物資訊，製化三維模型(mesh)(圖 3-8(c))。PhotoScan 支援多種立體匹配(stereo matching)演算法以針對不同應用進行最佳

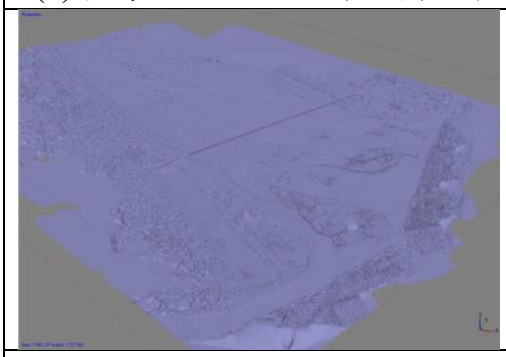
化。其中 Hieight Field 方法在重建地形特徵時能有較佳效果，所以較適用於航空攝影相片。第三步驟便是利用已建立模型搭配原始影像建立模型紋理貼片(圖 3-8(d))。PhotoScan 有針對正射影像的紋理模式，此模式能產生較為緊密的紋理貼片，最適用於處理航空攝影相片。



(a)影像位置與涵蓋範圍範例



(b)影像點雲模型



(c)空拍範圍三維模型



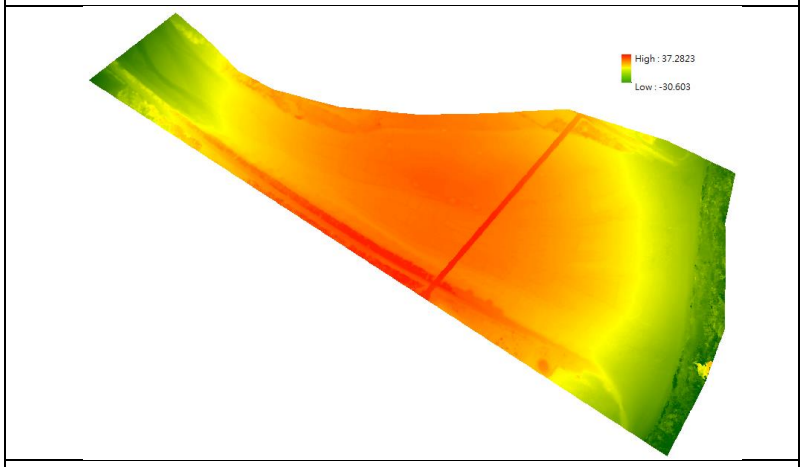
(d)影像紋理貼片模型

圖 3-8 影像處理成果歷程(卑南溪出海口範例)

依照航線規劃路徑執行飛航任務，取得原始影像資料後，需進行資訊後處理，程序包括圖檔鑲嵌影像、幾何糾正處理等，其成果為具空間相位關係之數位資訊，可與現有之地形圖、航空照片及衛星影像等圖形整合及套疊(圖 3-9)。



(a) 正射影像卑南溪出海口為例(解析度 0.04m)



(b)DTM 影像成果卑南溪出海口為例(解析度 1m)

圖 3- 9 航拍影像成果範例

二、 RTK 控制點布設與量測

本計畫將分別於拍攝範圍內挑選平均分佈的地面特徵點，作為後續的地面控制點與檢核點，現地則利用 VBS-RTK 測量儀器獲取其三維空間坐標值。

VBS-RTK 即時動態定位技術是 e–GNSS 即時動態定位系統之核心定位技術。其係採用多個衛星定位基準站所組成的 GNSS 網絡來評估基準站涵蓋地區之定位誤差，再配合最鄰近的實體基準站觀測資料，產製一個虛擬的基準站做為 RTK 主站，當再進行 RTK 差分計算處理後，系統誤差即可徹底消除，使用者當然可以快速且方便地獲得高精度、高可靠度及高可用性之即時動態定位成果。

將於各拍攝範圍內挑選明顯之地面標的物，例如現有之航空攝影十字標、停車格直角、或自行備置的圖標等。其佈設原則為：

1. 佈標點需易於察覺，對空通視必須廣闊，且不可位於物體之陰影內。
2. 佈標大小需視像比例尺及使用儀器而定，例如像比例尺為 1/5,000，標誌約需 15cm 寬。
3. 佈標形狀通常有十字形、Y 字形或 T 字形等；亦可選擇像片上選擇明顯易辨的地物點（例如路邊標線、斑馬線、停車格等），進行控制測量。
4. 佈標材料需考量氣候狀況及保存時間等因素，可用油漆、塑膠帆布等，一般多採用高對比的紅色、白色或黃色。

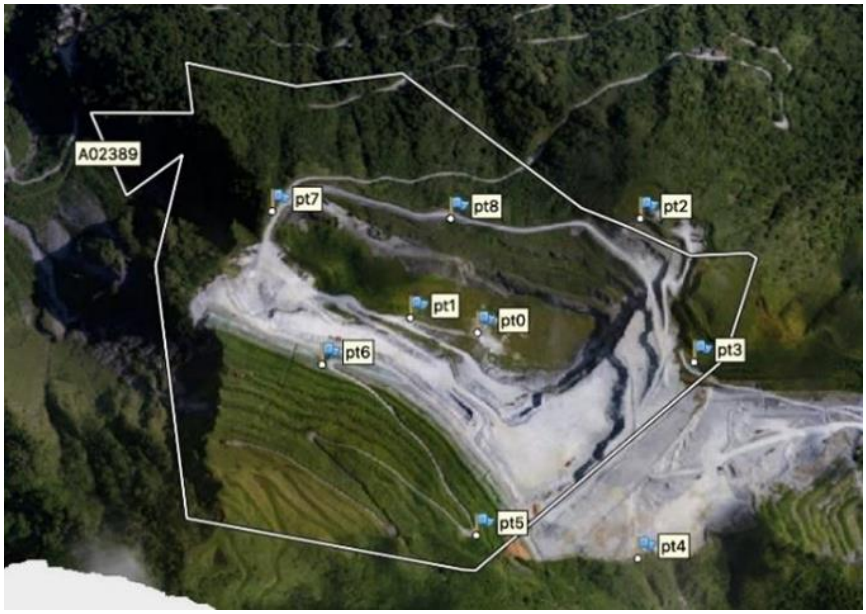


圖 3- 10 控制點佈設範例



圖 3- 11 航測點布設及控制點測量作業情形

三、 全站儀量測

(一) 全站儀的使用步驟

1. 安置全站儀：將全站儀安置於測站，反射稜鏡安置於目標點。對中及整平方法與光學經緯儀相同。新型全站儀還具有激光對點功能，其對中方法為：安置、整平儀器，開機後打開激光對點器，鬆開儀器的中心連接螺旋，在架頭上輕移儀器，使顯示屏上的激光對點器的光斑對準地面測站點的標誌，然後擰緊連接螺旋，同時旋轉腳螺旋使管水準氣泡居中，再按 ESC 鍵自動關閉激光對點器即可。儀器具有雙軸補償器，整平後氣泡略有偏差，但對測量並無影響。



圖 3- 12 三腳架的三個伸縮螺旋旋緊之後安放全站儀

2. 開機：打開電源開關（按下 POWER 鍵），顯示器顯示當前的稜鏡常數和氣象改正數及電源電壓。如電量不足應及時更換電池。
3. 儀器自檢：轉動照準部和望遠鏡各一周，對儀器水平度盤和豎直度盤進行初始化（有的儀器無需初始化）。
4. 設置參數：稜鏡常數的檢查與設置：檢查儀器設置的常數是否與儀器出廠時給定的常數或檢定後的常數一致，不一致時應予以改正。氣象改正參數設置：可直接輸入氣象參數（環境氣溫 t 與氣壓 p），或從隨機所帶的氣象改正表中查取改正參數，還可利用公式計算，然後再輸入氣象改正參數。
5. 進行角度、距離、坐標測量：在標準測量狀態下，角度測量模式、斜距測量模式、平距測量模式和坐標測量模式之間可互相切換。全站儀精確照準目標後，通過不同測量模式之間的切換，可得到所需的觀測值。
6. 照準、測量：方向測量時應照準標杆或覘牌中心，距離測量時應瞄準反射稜鏡中心，按測量鍵顯示水平角、垂直角和斜距，或顯示水平角、水平距離和高差。
7. 結束：測量完成，關機，將儀器設備收回適宜位置。

(二) 全站儀的基本操作和使用方法

1. 水平測量

(1). 按角度測量鍵，使全站儀處於角度測量模式，照準第一個目標 A。
(2). 設置 A 方向的水平度盤讀數為 0°00′00”。
(3). 照準第二個目標 B，此時顯示的水平度盤讀數即為兩方向間的水平夾角。

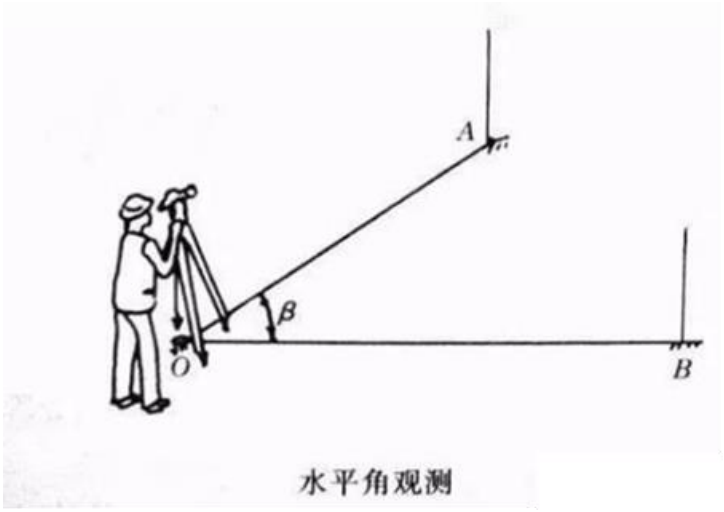


圖 3- 13 水平腳量測

2. 距離測量

(1). 設置稜鏡常數。測距前須將稜鏡常數輸入儀器中，儀器會自動對所測距離進行改正。

(2). 設置大氣改正值或氣溫、氣壓值。光在大氣中的傳播速度會隨大氣的溫度和氣壓而變化，15℃和 760mmHg 是儀器設置的一個標準值，此時的大氣改正為 0ppm。實測時，可輸入溫度和氣壓值，全站儀會自動計算大氣改正值（也可直接輸入大氣改正值），並對測距結果進行改正。

(3). 量儀器高、稜鏡高並輸入全站儀。

(4). 距離測量。照準目標稜鏡中心，按測距鍵，距離測量開始，測距完成時顯示斜距、平距、高差。

全站儀的測距模式有精測模式、跟蹤模式、粗測模式三種。精測模式是最常用的測距模式。在距離測量或坐標測量時，可按測距模式（MODE）鍵選擇不同的測距模式。應注意，有些型號的全站儀在距離測量時不能設定儀器高和稜鏡高，顯示的高差值是全站儀橫軸中心與稜鏡中心的高差。

3. 座標測量

(1). 設定測站點的三維坐標。

(2). 設定後視點的坐標或設定後視方向的水平度盤讀數為其方位角。當設定後視點的坐標時，全站儀會自動計算後視方向的方位角，並設定後視方向的水平度盤讀數為其方位角。

(3). 設置稜鏡常數。

(4). 設置大氣改正值或氣溫、氣壓值。

(5). 量儀器高、稜鏡高並輸入全站儀。

(6). 照準目標稜鏡，按坐標測量鍵，全站儀開始測距並計算顯示測點的三維坐標。

(三)操作注意事項

(1). 使用前應先閱讀說明書，對儀器進行全面的了解，然後著重學習一些基本操作，如測角、測距、測坐標、數據存儲和系統設置。

(2). 全站儀安置在三腳架之前，應檢查三腳架的三個伸縮螺旋是否旋緊。利用連接螺旋儀器將其固定在三腳架上之後才能放開儀器。

(3). 切勿在開機狀態下插拔電纜，電纜和插頭應保持清潔、乾燥，插頭如有污物應進行清理。

(4). 電子手簿應定期進行檢定或檢測，並進行日常維護。

(5). 電池充電時間不能超過專用充電器規定的充電時間，否則可能會將電池燒壞或縮短電池的使用壽命。

(6). 望遠鏡不能直接被太陽照準，以防損壞測距部發光二極體。@建築界一哥

(7). 儀器應保持清潔、乾燥，遇雨後應立即將儀器擦乾，放在通風處，待儀器完全晾乾後方可裝箱。

(8). 凡遷站均應先關閉電源並將儀器取下裝箱搬運。

四、 手持式 LiDAR 裝置

系指搭載於行動裝置上之三維掃描裝置，手持式 LiDAR 裝置是一種便攜式激光雷射測量儀器，用於快速捕捉和測量其所對向的物體或環境的三維空間點的距離和位置。它能夠通過發射激光束並接收返回的光束來測量距離，並根據測量的時間來計算物體的位置。由於其便攜性和高精度的特性，手持式 LiDAR 裝置在許多應用領域中正被廣泛使用。

一、 手持式 LiDAR 裝置前置準備

1. 建議設備需求: IPhone12 Pro 以上 、IPad Pro 以上
2. 本計畫採用裝置:IPhone14 Pro 、IPad Pro
3. 使用軟體:3D Scanner App

二、 手持式 LiDAR 裝置使用步驟

1. 打開軟體，右下角 NORMAL 選項即為 LiDAR 掃描模式。
2. 按下中間紅色錄製鍵即可開始掃描。
3. 保持平穩移動，畫面中紅色網格即會慢慢變為透明，代表已掃描。
4. 掃描完成後按下停止錄製，稍等片刻。
5. Process Scan 選擇想要的解析度並按下 Start 開始生成掃描成果。
6. 掃描成果將會儲存在首頁左下角 SCANS 面板裡面。
7. 若需輸出成果，按下右下角 Share，選擇想要的格式並輸出。
8. 若需測量尺寸，按下方 Measure，選擇 Tape Measure 做基本的長寬高測量。

三、 手持式 LiDAR 裝置注意事項

1. 在工地測量時需配戴安全帽，維持基本人身安全。
2. 掃描過程中，盡量周遭無人，如將人像掃入可能使成像錯亂、效果不佳。
3. 掃描前先規劃好路線，避免重複掃描太多次，導致成像不佳。
4. 掃描中如遇樹葉、鋼筋、欄杆等簍空度多的物品，要嘗試近距離多方向掃描，才容易消除紅色網格，但成像效果依然會不及其他構造物。
5. 如遇水面等反光嚴重區域，成像效果會不及其他構造物。

第二節 量測方案說明

本研究首先透過 IPhone LiDAR 針對本校開放空間設施的掃描建構，並比對掃描速度、高度及環境背景(單一構造物、複合背景、植生及水面)等因素，對 IPhone LiDAR 成像及數值成果之差異，爾後再與傳統量測工具進行比較；第二步再將較為穩定的掃描操作方式運用在水土保持工程中常見的構造物，與傳統量測工具進行比對。

一、 IPhone LiDAR 量測方案

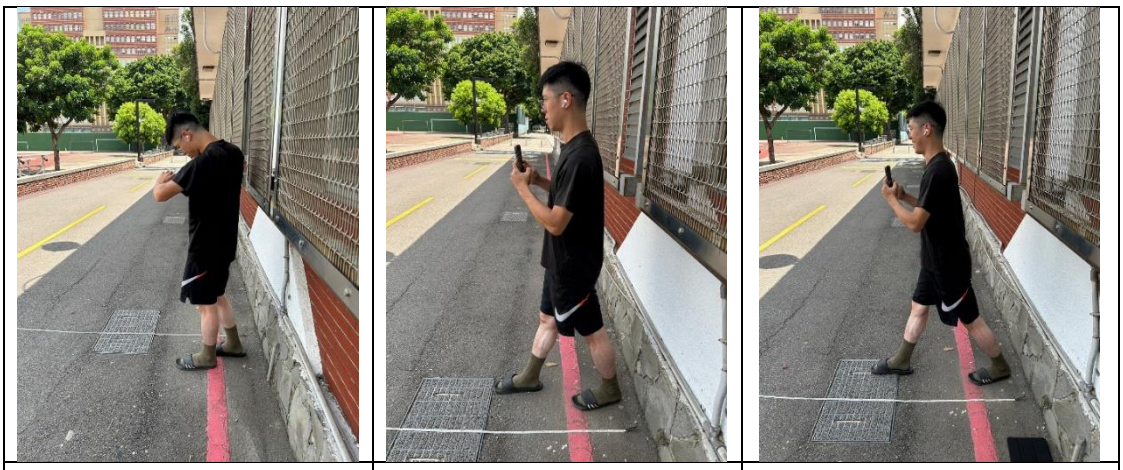
(一) IPhone LiDAR 操縱性

為了解手持式 IPhone LiDAR 使用方法上對於成果之影響程度，故選定常態使用上較易產生人為差異的兩項因子來做實驗，分別為測量速度及測量高度，坦討其因子在相異的情況下是否會影響測量結果，詳如下所示：

1. 量測速度

本研究為實驗手持式 IPhone LiDAR 對於量測時移動速度之影響

進行不同移動速度之測試，雖然裝置畫面中是由網格抓取資訊但各網格停留時間仍會導致掃描成果上之差異，因速度對手持式 IPhone LiDAR 屬影像判讀時間之差異，固本實驗將相同目標物施以不同時常的掃描，用以確認其成像之差異(5m/10s、5m/30s、5m/60s)如圖 3-14。



(a).5m/25s	(b).5m/12.5s	(c).5m/8.3s

圖 3-14 相異移動速度

2. 量測高度

本研究為實驗手持式 IPhone LiDAR 對於量測高度之影響進行不同高度之測試，因高度對於手持式 IPhone LiDAR 影響屬於角度對於影像擷取判讀之關係，固本實驗採像一高度對單一物件進行量測，其量測高度約為距地面(0.5m、1m、1.5m)如圖 3-15。



(a).0.5m	(b).1m	(c).1.5m

圖 3-15 距地高度差異

3. IPhone 與 I pad 之比較

在手持式 LiDAR 測試的硬體部分選擇較常見的 IPhone 與 IPad 做為比較，分別在操作、成果上比對其差異，固本計畫擬實驗對於不同環境下目標物捕捉之成果呈現差異，選定實驗條件含(單一物件、複合物件、目標物周遭具植生、目標物周遭含水面)。

(二)IPhone LiDAR 目標物類型

由於手持式 IPhone LiDAR 雖具有捕捉點雲及影像資訊的功能，但其規格仍屬於手機本身所搭載之相機規格，相機本身對於影像判讀具有聚焦及廣角等功能，所以在呈現上極有可能會顯示出差異，固本計畫擬實驗對於不同環境下目標物捕捉之成果呈現差異，選定實驗條件含(單一物件、複合物件、目標物周遭具植生、目標物周遭含水面)如圖 3-16。


單一物件


複合物件


目標物周遭具植生


目標物周遭含水面

圖 3- 16 測量目標種類

二、 校內量測方案

針對手持式 IPhone LiDAR 操縱性比對後，選定最佳化操作方式，在校園內針對既有構造物進行測量，將其成果與常見測量工具(鋼捲尺、全站儀及 UAV)進行對比。

其中，各項測量工具間除了量測數值本身外，亦要確認測量結果之呈現，資料的完整度以及適用之場域，各項工具量測如圖 3-17 所示



(a).全站儀測量 (b).鋼捲尺測量

(c).IPhone LiDAR 測量 (d).UAV

圖 3- 17 各項工具測量

三、 工程構造物量測方案

1. 工程樣區選定

將手持式 IPhone LiDAR 於校內設施測量施作完成後，即可將此項技術嘗試運用於工程構造物，而已完工構造物不只需克服測量儀器本身精度問題，對於使用者及現場環境的多變性仍是一大挑戰，故在地點的選擇上也是相當重要圖 3-18，比較完 111 年竣工工程後，考量到測量施作的安全性及成果展示完整度，本計畫選定 112 年完工工程做為實驗對象，其原因為工區剛整理完畢、構造物本身完整性較高。



111 年竣工工程



112 年竣工工程

圖 3-18 工程選定

2. 測量比對項目

完成校園內測量後，確認手持式 IPhone LiDAR 可以運用於構造物量測，即規劃至現地(竣工水土保成工程)進行測量，將其成果與常見測量工具(鋼捲尺、全站儀及 UAV)進行對比。

其中，各項測量工具間除了量測數值本身外，亦要確認測量結果之呈現，資料的完整度以及適用之場域，各項工具量測如圖 3-19 所示。



(a).全站儀



(b).RTK



(c).手持式 IPhone LiDAR



(d).手持式 IPhone LiDAR



(e).UAV 傾拍



(f).UAV 正攝



(g).鋼捲尺尺寸測量



(h).鋼捲尺尺寸測量

圖 3-19 各項工具量測過程

四、 施工中工地追蹤量測

(一)工地樣區選定

將手持式 IPhone LiDAR 掃描技術用於施工中之工地，其工程樣區選定由農村發展及水土保持署內各轄區中施工中之水土保持工程及農村再生工程進行篩選，並針對工程內容既有構造物進行掃描，透過工程管考系統網羅符合工程階段之工程，並與工程主辦及監造單位負責工程師保持聯繫，最終該計畫針對掃描對象篩選出工程如表 3-1 所示。

表 3-1 選定樣區工程資訊

年度	計畫名稱	工程名稱	執行單位	縣市	鄉鎮	工程內容
112	農村再生社區發展及環境改善計畫	三義鄉雙潭社區香菇亭周邊環境改善工程	臺中分署	苗栗縣	三義鄉	1.陶板擋土牆 65m 2.裝置藝術 1 座 3.無障礙坡道 20m 4.既有設施改善及環境整理 1 式 5.地坪改善 20m2
112	治山防災(土砂災害防治)	旱坑里 9 鄰野溪治理工程	臺北分署	新竹縣	新埔鎮	1.固床工約 3 座高約 1.5m 長約 6m、2.固床工約 3 座高約 1m 長 3m、3.護岸高約 3m 長約 220m
112	治山防災(土砂災害防治)	寶石里 6 鄰石頭坑野溪治理工程	臺北分署	新竹縣	新埔鎮	1.固床工約 8 座高約 2m 長約 8m、2.護岸高約 3.5m 長約 520m、3.端牆 5 座高約 4m 長約 2m、4.生物通道 2 處、5.既有結構物打除 72m、6.取水設施 2 處、7.支流處理 1 處

(二)量測項目及進度追蹤

針對選定工地樣區內之工程內容進行不同工程進度之 IPhone

LiDAR 掃描，並將掃描成果匯出成果，將成果比對工程施工圖、IPhone、IPad、空拍機拍攝成像、傳統測量工具做比對，其主要呈現相異進度下 IPhone LiDAR 掃描之成果，並展現其追蹤及該技術之利弊。

第四章 量測成果與分析

第一節 量測成果

一、IPhone LiDAR 測量方案成果

(一) IPhone LiDAR 使用方法與成果

1. 速度量測

在 5m/25s、5m/12.5s、5m/8.3s 三種速度下針對同一目標物進行 LiDAR 掃描，三組實驗後可以從圖 4-1 成果發現，在 5m/25s 的速度下 LiDAR 捕捉到的點雲數明顯高於 5m/12.5s 及 5m/8.3s，而 5m/12.5s 及 5m/8.3s 卻沒有顯著差異，而且 5m/8.3s 捕捉到的點雲數甚至高於 5m/12.5s。

速度	5m/25s	5m/12.5s	5m/8.3s
成像			
點雲數	721125	615075	651141

圖 4-1 20cm/s、40cm/s、60cm/s 點雲數、成像差異比較

2. 高度量測

在 0.5m、1m、1.5m 三種高度下針對同一目標物進行 LiDAR 掃描，三組實驗後可以從圖 4-2 成果發現，在 1.5m 的高度下 LiDAR 捕捉到的點雲數最多，但與 1m 高差異不大，不過看到成果成像可以發現 1.5m 高度拍攝的目標物成果完整度最高。

高度	0.5m	1m	1.5m
成像			
點雲數	198478	350349	353895

圖 4-2 0.5m、1m、1.5m 點雲數、成像差異比較

3. IPhone 與 IPad 之比較

透過 IPhone 與 IPad 的 LiDAR 測量結果詳見附件一可以發現，單純的構造物以 IPhone 掃描較為精準，誤差百分率趨近於 0，但若在構造物中還有細部構造則建議使用 IPad 掃描較為精準，誤差百分率趨近於 0。若構造物具有透光性、反射光線、或者水深較深的區域，則較難以掃瞄出完整的構造物，詳細尺寸及誤差如表 4-1。

掃描時需要較緩慢的移動，才能將構造物的的立體感掃描出來，若移動太快可能會產生模糊的狀況，或者構造物呈現歪斜的情況，建議在掃描的過程中儀器高度放置於腰部，與構造物呈現垂直(90 度)的方式掃測。

LiDAR 本身有測量長度的功能，在數值 1 公尺以下可量測至小數點以下第二位，但數值若超過 1 公尺以上則會自動省略個位數字，可能影響精準度的誤差。在測量時需要自行移動量測點的位置才可測量其長度，而有可能會因螢幕大小、手指粗度、掃描影像的完整度，而有所影響測量的精準度。

表 4-2 構造物量測尺寸及誤差

項目	原尺寸(cm)			IPhone(cm)			IPad(cm)			IPhone 誤差率(%)			IPad 誤差率(%)		
	長	寬	高	長	寬	高	長	寬	高	長	寬	高	長	寬	高
木製花圃	-	-	46.5	-	-	41.9	-	-	40.8	-	-	9.0%	-	-	12.0%
石頭座椅#1	146.0	39.0	40.0	140.0	37.7	36.3	140	30.3	36.3	4.0%	3.0%	9.0%	4.0%	7.0%	9.3%
石頭座椅#2	150.0	60.0	29.0	150.0	63.0	25.1	150	56.0	23.9	0%	5.0%	13.4%	0.0%	6.7%	17.6%
鐵製座椅	458.0	-	-	450.0	-	-	450	-	-	1.7%	-	-	1.7%	-	-
木頭座椅	195.0	195.0	62.0	190.0	190.0	61.0	190	190.0	58.0	2.6%	2.6%	1.6%	2.6%	2.6%	6.5%
橋梁	409.0	160.6	18.6	397.0	160.0	-	-	156.0	-	-	0.6%	-	-	5.6%	-
樓梯側邊	-	-	281.0	-	-	280.0	-	-	270.0	-	-	0.4%	-	-	3.9%
階梯	163.0	29.0	14.0	160.0	28.2	12.3	160	29.1	12.7	1.8%	2.6%	11.7%	1.8%	0.3%	9.0%

二、校園內構造物測量成果

本節展示於校內測量之成果，分別使用工具(全站儀、鋼捲尺、手持式 IPhone LiDAR、無人飛行載具(UAV))並針對校內開放空間可見之設施進行量測，其項目工具比對如表 4-2 所示，而各工具量測成果如下：

表 4-3 測量項目工具表

項目/設施	石椅	石牆	木椅	花圃	樓梯	木橋
全站儀	○	○				○
鋼捲尺、箱尺	○	○	○	○	○	○
手持式 IPhone LiDAR	○	○	○	○	○	○
無人飛行載具(UAV)	○	○	○	○	○	○

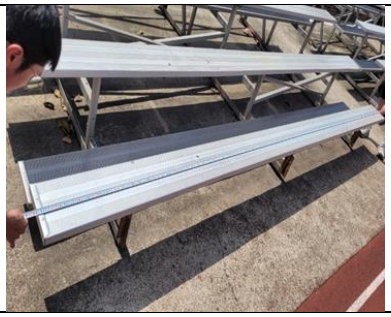
(一)鋼捲尺、箱尺

鋼捲尺、箱尺在測量人員可以抵達的情況下應為較穩定之測量工具，潛在的誤差因子也較少，固本研究將鋼捲尺、箱尺所測量之數據做為其餘量測工具誤差判斷之基準，其在各設施量測成果展示如表 4-3 所示。

表 4-4 鋼捲尺、箱尺量測成果表

設施名稱	成果影像		
石椅			
尺寸測量	長：140cm	寬：39cm	高：40cm

設施名稱	成果影像		
樓梯			
尺寸測量	長：163cm	寬：29	高：14
設施名稱	成果影像		
木椅			
尺寸測量	長：190cm	寬：190cm	高：62cm
設施名稱	成果影像	設施名稱	成果影像
石牆		花圃	
尺寸測量	高：281cm	寬：	高：44cm
設施名稱	成果影像		

木板橋			
尺寸測量	長：409cm	寬：160.6cm	高：18.6cm
設施名稱	成果影像		
階梯椅			
尺寸測量	長：458cm		

(二)全站儀測量

全站儀屬常見之測量儀器，優點於精度高、用途廣，但成果屬點資料成果若須展現精細的線或面資料須密集測量，其時間成本及測量人員本身技術就是一大考量點，其設施(石椅、石牆及橋梁)測量成果如表 4-4。

表 4- 5 全站儀量測成果表

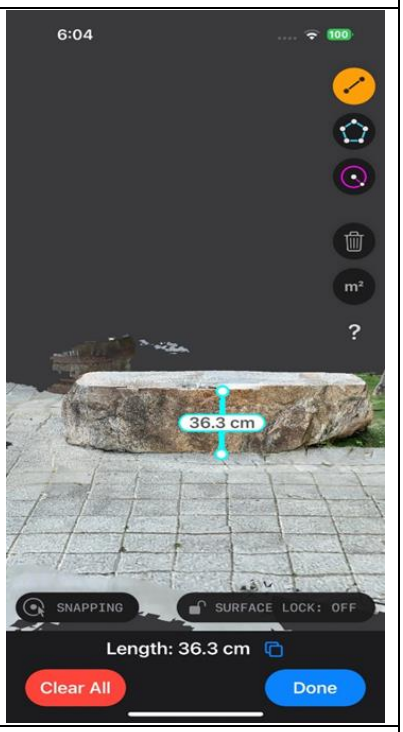
設施名稱	數據影像	設施名稱	數據影像
全測站 數據		全測站 數據	
尺寸測量	高：40.6cm		高：255.1cm
設施名稱	成果影像		

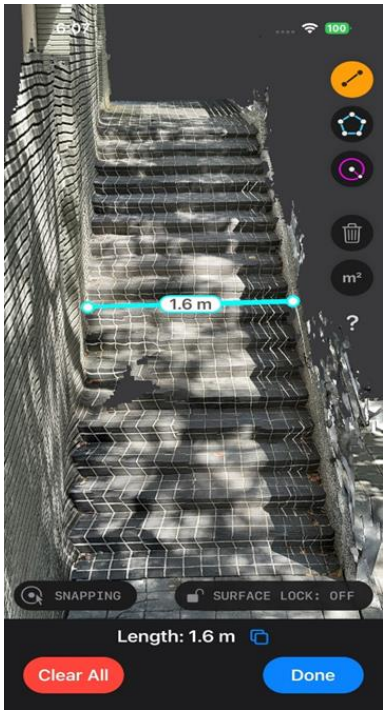
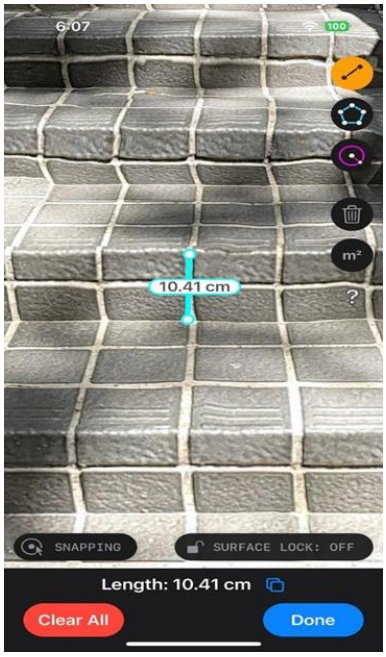
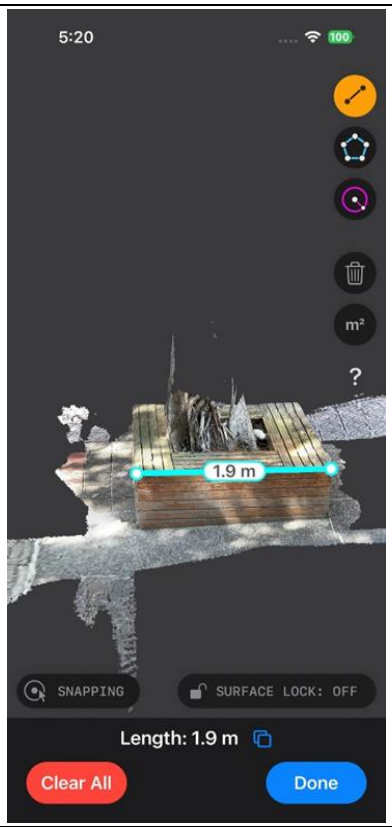
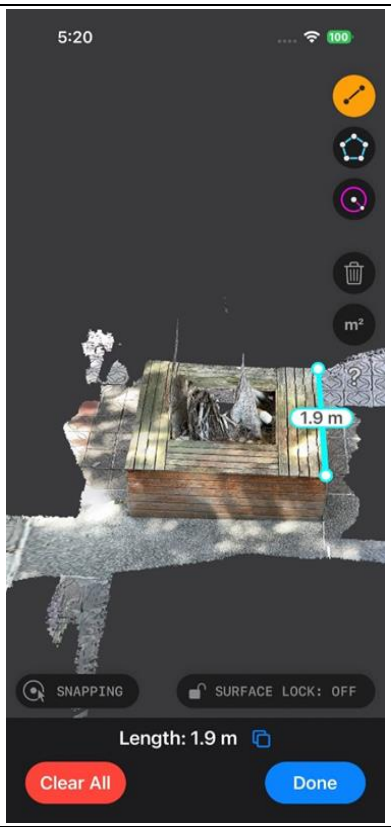
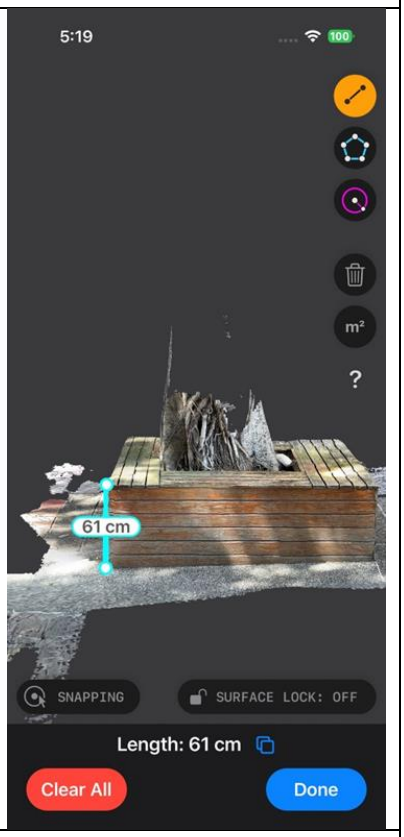
全測站 量測橋梁			
尺寸測量	長：406cm	寬：181.5cm	高：17cm

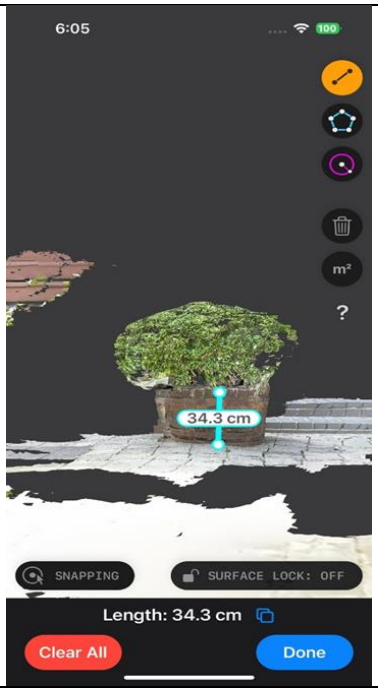
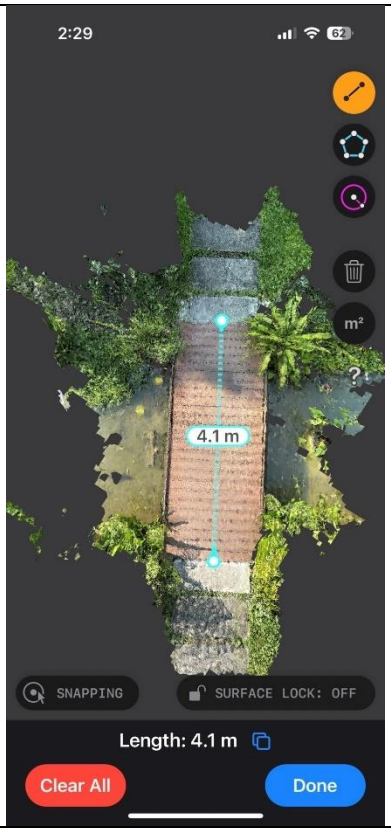
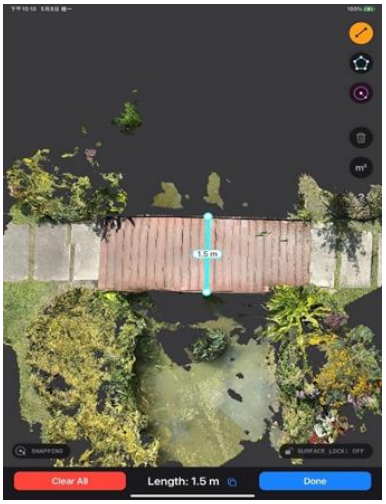
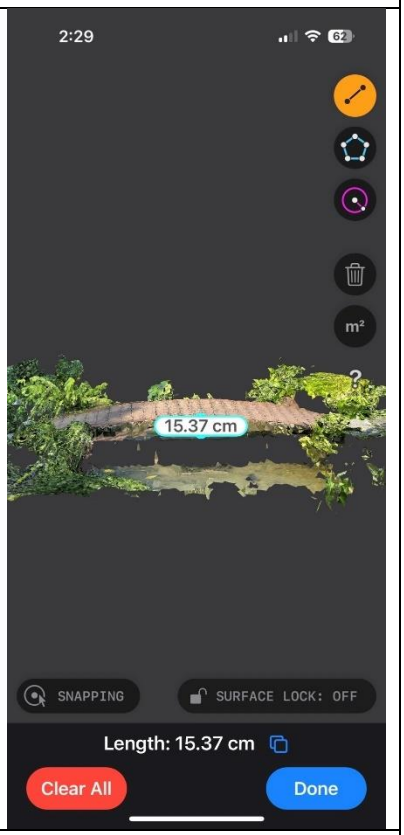
(三)手持式 IPhone LiDAR

本計畫重點研究之測量工具，透過比對各項儀器之成果探討其適應之測量情境，其測量條件需滿足距離構造物在 LiDAR 能夠捕捉到目標物點雲範圍之內，其於校內設施測量實做成果如表 4-5。

表 4- 6 手持 IPhone LiDAR 量測成果表

設施名稱	成果影像		
石椅(長) 石椅(寬) 石椅(高)			
尺寸測量	長：140cm	寬：34.8cm	高：36.3cm
設施名稱	成果影像		

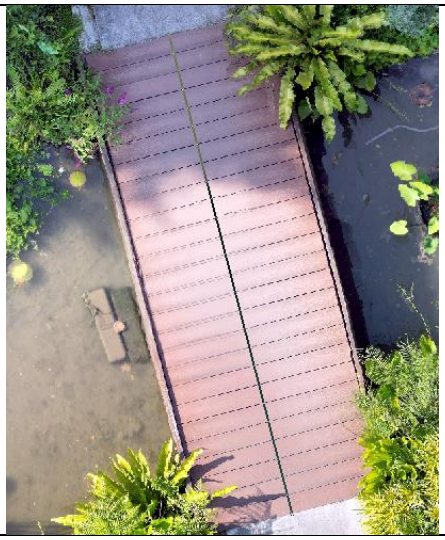
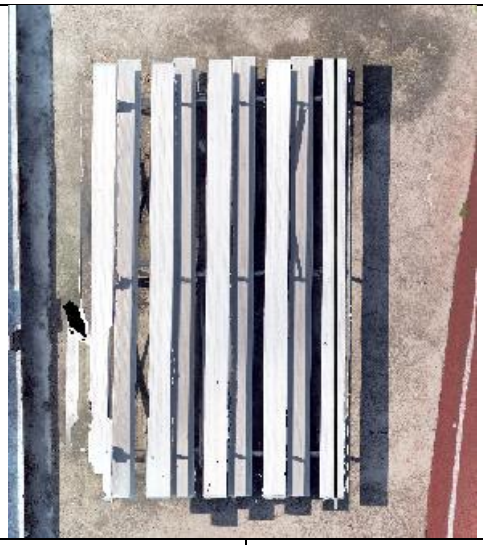
<table>
<tr><td>樓梯
(階寬)
(階深)
(階高)</td><td>
</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>尺寸測量</td><td>長：160cm</td><td>寬：20.39cm</td><td>高：10.41cm</td></tr>
<tr><td>設施名稱</td><td colspan="3">成果影像</td></tr>
<tr><td>木椅(長)
木椅(寬)
木椅(高)</td><td>
</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>尺寸測量</td><td>長：190cm</td><td>寬：190cm</td><td>高：61cm</td></tr>
<tr><td>設施名稱</td><td colspan="3">成果影像</td></tr>
</table>

石牆(高)		花圃(高)	
尺寸測量	長：280cm	寬：34.8cm	高：34.3cm
設施名稱	成果影像		
橋梁(長) 橋梁(寬) 橋梁(厚)			
尺寸測量	長：410cm	寬：150cm	高：15.37cm

(五)無人飛行載具(UAV)

無人飛行載具(UAV)於現今測量技術方面已具備豐富且成熟的運用成果，尤其是其能夠進入到難以行走或是遭阻斷的區域，除了能夠迅速且大範圍的做拍攝外，亦能有高精度之成果產出，無人飛行載具(UAV)於校園內設施之測量成果如表 4-6。

表 4- 7 UAV 影像成果表

設施名稱	成果影像	
橋梁		
尺寸測量	長：397cm	寬：156cm
設施名稱	成果影像	
階梯椅		
尺寸測量	長：474cm	寬：156cm

三、工程構造物測量成果

經過校內各項設施的測量後，本計畫將樣區移至水土保持工程工區，於現場勘查後考量安全性及既有構造物完整性而選定台中分局「黃竹里黃竹段 595 地號排水改善工程」實施常見的測量型態實施量測，分別是工區斷面測量及工區構造物測量，因應工區存在之排水溝進行斷面測量及塊狀護欄實之構造物測量，工區環境概況如圖 4-3。

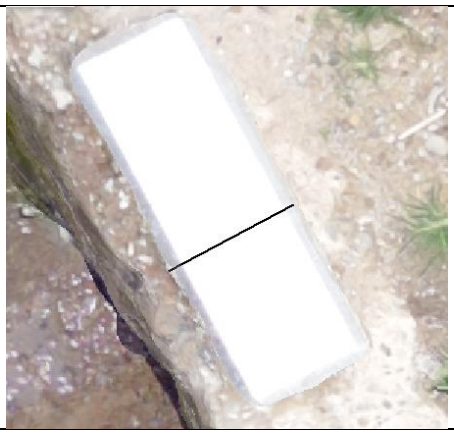


圖 4-3 工區現況照

(一)構造物測量成果

構造物尺寸量測為測量中常見之方法，為試驗手持式 IPhone LiDAR 技術是否能有效運用在常見的測量工作中使用，故本計畫將常見量測工具搭配手持式 IPhone LiDAR 進行塊狀護欄量測，並對成果比對詳見表 4-7。

表 4-8 塊狀護欄成果表

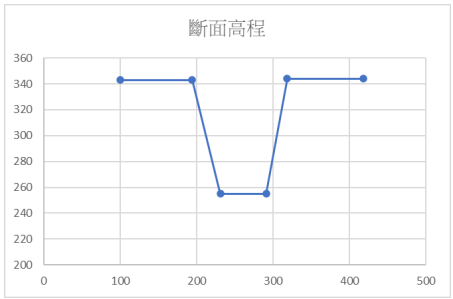
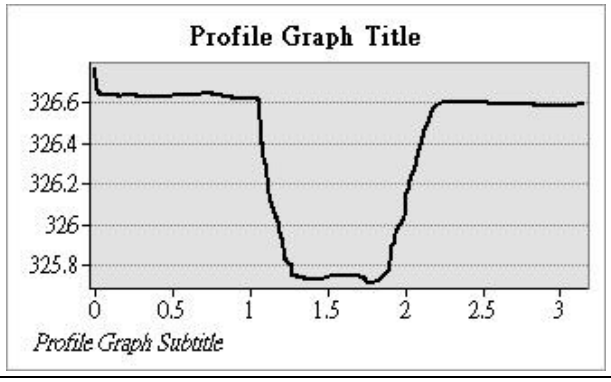
工具名稱	成果影像		
鋼捲尺			
尺寸測量	長：101.5cm	寬：30.5cm	高：53.2cm
工具名稱	成果影像		
IPhone LiDAR			
尺寸測量	長：100cm	寬：30.8cm	高：47.3cm
工具名稱	成果影像		
全站儀			
尺寸測量	長：101cm	寬：30cm	高：54cm
工具名稱	成果影像		
無人飛行載具 (UAV)			
尺寸測量	長：104cm	寬：31cm	

(二)斷面測量成果

斷面測量為測量中常見的量測方法，為試驗手持式 IPhone LiDAR 技術是否能有效運用在常見的測量工作中使用，故本計畫將常見量測工具搭配手持式 IPhone LiDAR 進行排水溝斷面量測，其成果比對詳見表 4-8。

表 4-9 工區排水溝斷面測量成果表

<table>
<tr><td>工具名稱</td><td colspan="2">成果影像</td></tr>
<tr><td>IPhone LiDAR</td><td></td><td>


</td></tr>
<tr><td>工具名稱</td><td colspan="2">成果影像</td></tr>
<tr><td>全站儀</td><td></td><td>
<table>
<tr><td rowspan="6">斷面</td><td>1</td><td>10°23' 02"</td><td>14.430</td><td>1.773</td></tr>
<tr><td>2</td><td>6°44' 50"</td><td>14.063</td><td>1.772</td></tr>
<tr><td>3</td><td>5°34' 33"</td><td>14.007</td><td>0.92</td></tr>
<tr><td>4</td><td>2°59' 47"</td><td>13.858</td><td>0.952</td></tr>
<tr><td>5</td><td>1°43' 19"</td><td>13.694</td><td>1.754</td></tr>
<tr><td>6</td><td>357°56' 42"</td><td>13.362</td><td>1.746</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>工具名稱</td><td colspan="2">成果影像</td></tr>
<tr><td>無人飛行載具 (UAV)</td><td></td><td>
</td></tr>
</table>

四、施工中工地追蹤量測成果

經過校內實驗及竣工工程實作後，確認其 IPhone LiDAR 技術可於水土保持工地及農村再生工程工地內使用，透過將計畫需求之功成篩選完畢後擇定「三義鄉雙潭社區香菇亭周邊環境改善工程」、「旱坑里 9 鄰野溪治理工程」、「寶石里 6 鄰石頭坑野溪治理工程」，其篩選條件包含：工區環境較為安全、工區工項構造物進度事宜，其分別展示工區各進度現況、工區構造物進度、構造物尺寸掃描量測情形。

(一)工區各進度現況掃描

本實驗於「三義鄉雙潭社區香菇亭周邊環境改善工程」、「旱坑里 9 鄰野溪治理工程」、「寶石里 6 鄰石頭坑野溪治理工程」三處工地進行 LiDAR 掃描，並依據相異工程進度呈現掃描成果，其中掃描成像之展示為本技術的一大亮點本計畫將與空拍機一併展示其成果影像展示，依據各工程進度掃描成果成像請見附件三，其各別工程資訊如下：

(1). 三義鄉雙潭社區香菇亭周邊環境改善工程工地掃描

本工程位於苗栗縣三義鄉，使用 IPhone、IPad、空拍機針對該工程內容之構造物(階梯)為掃描目標，分別掃描時間點為 112 年 8 月 23 日(工程進度 33%)、112 年 10 月 3 日(實際進度 68%)、112 年 10 月 31 日(實際進度 88%)。

(2). 旱坑里 9 鄰野溪治理工程工地掃描

本工程位於新竹縣新埔鎮，使用 IPhone、IPad、空拍機針對該工程內容之構造物為掃描目標，分別掃描時間點為 112 年 10 月 3 日(工程進度 27.5%)、112 年 10 月 19 日(實際進度 56.04%)、112 年 10 月 31 日(實際進度 90.6%)。

(3). 寶石里 6 鄰石頭坑野溪治理工程工地掃描

本工程位於新竹縣新埔鎮，使用 IPhone、IPad、空拍機針對該工程內容之構造物為掃描目標，分別掃描時間點為 112 年 10 月 3 日(工程進度 82.2%)、112 年 10 月 19 日(實際進度 83.4%)、112 年 10 月 31 日(實際進度 86.09%)。

(二)工區各進度溝造物掃描

本計畫追蹤工地雖以工程進度為基準，但若細部探討工程內容構造物亦有進度之分，而計畫運用密集的掃描頻率來觀察 IPhone LiDAR 技術掃描成果能否追蹤構造物之進度變化，並透過其成果分析該技術於實務上之可行性，本計畫追蹤工程構造物之量測成果詳如附件四。

(1). 三義鄉雙潭社區香菇亭周邊環境改善工程

工程內容含有階梯，本計畫於該工程構造物實施三次 LiDAR 掃描，分別為工區整地完畢尚無構造物階段、樓梯本體構造物以澆置完畢、樓梯欄杆及表面修飾皆已施做完畢三階段如圖 4-4。



112/08/23 進度 33.00%



112/10/31 進度 86.09%

圖 4-4 三義鄉雙潭社區香菇亭周邊環境改善工程現況

(2). 旱坑里 9 鄰野溪治理工程

本工程內容構造物包含護岸、固床工，經過三次掃描工區變化大致分為野溪溪底鋪設與否如圖 4-5。


112/10/03 進度 27.50%


112/10/19 進度 56.04%

圖 4-5 旱坑里 9 鄰野溪治理工程現況

(3). 寶石里 6 鄰石頭坑野溪治理工程

工程內容構造物包含護岸、固床工及生物通道等，由於三期掃描期間工區皆屬施工中，故工區內環境土砂較多，構造物表面亦存在土堆期工區現況如圖 4-6。


112/10/03 進度 82.20%


112/10/31 進度 86.09%

圖 4-6 寶石里 6 鄰石頭坑野溪治理工程現況

(三)構造物尺寸量測

本計畫為確認 IPhone LiDAR 技術亦能展現尺寸量測量化成果，將工地現場掃描量測成果用以比對工程施工圖及傳統尺規量測數值之差異，其量測成果詳如附件五。

第二節 成果分析

一、IPhone LiDAR 展示效果比對

除了測量操作上的差異外，本計畫亦對測量成果的展示方式進行比對，透過視覺上、介面上，所呈現出的資訊加以比較，也針對不同情境、目標物及環境下的成果進行展示，雖然 IPhone LiDAR 具有一定的方便性及介面簡易等特性，但對於水面、植生及複雜地貌似乎亦距討論性。

(一)基本成像比對

針對各項工具(傳統尺規、全站儀、無人飛行載具及 IPhone LiDAR)進行成果展示比對，個結果呈現如下

(a). 傳統尺規：其優缺點及基本成果展示如下圖 4-4。

a-1 優點：較易於判讀，且不易產生誤差。

a-2 缺點：需測量人員行走到之處才能測量，使用範圍上遭受限制，呈現成果多僅能為距離資料。

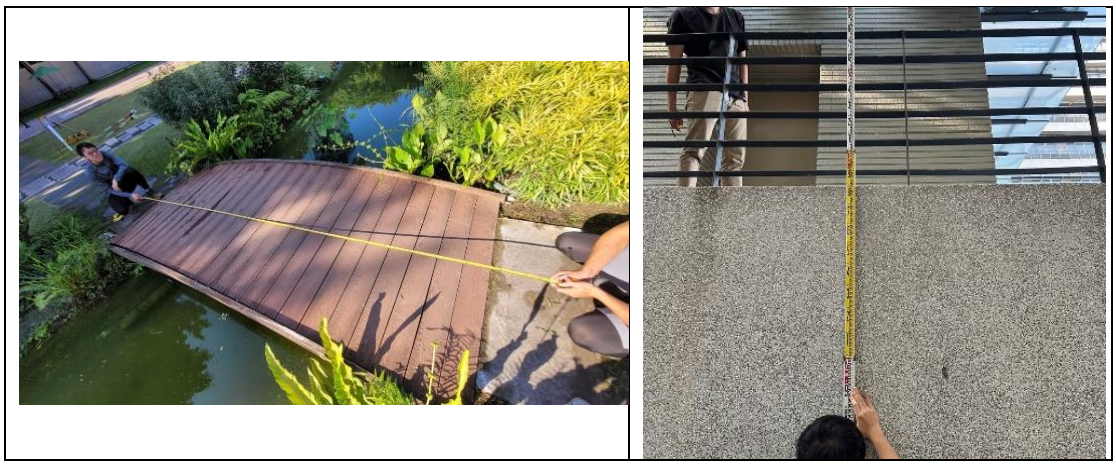


圖 4- 7 傳統尺規使用現況

(b). 全站儀：其優缺點及基本成果展示如下圖 4-5。

b-1 優點：於現存工區大量使用，亦常使用於河川及渠道等進行量測，具備精度高及穩定的特性。

b-2 缺點：使用者需精熟此技能，且儀器成本高不易取得，因為產出成果為點資訊，其成果精密度須取決於點數的施做密度。

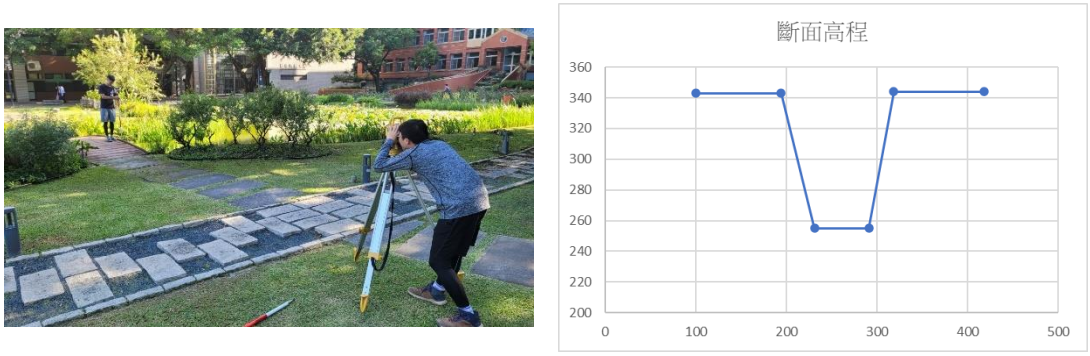


圖 4- 8 全站儀使用情況與成果產製

(c). 無人飛行載具：其優缺點及基本成果展示如下圖 4-6。

c-1 優點：於現代測量中廣泛被使用，如欲量測地形或距離測量人員前往窒礙難行之處即可使用該工具，其具備大範圍測量、高精度、且具備現況拍攝功能。

c-2 缺點：需具備相關測量知識，及基本操作技術。

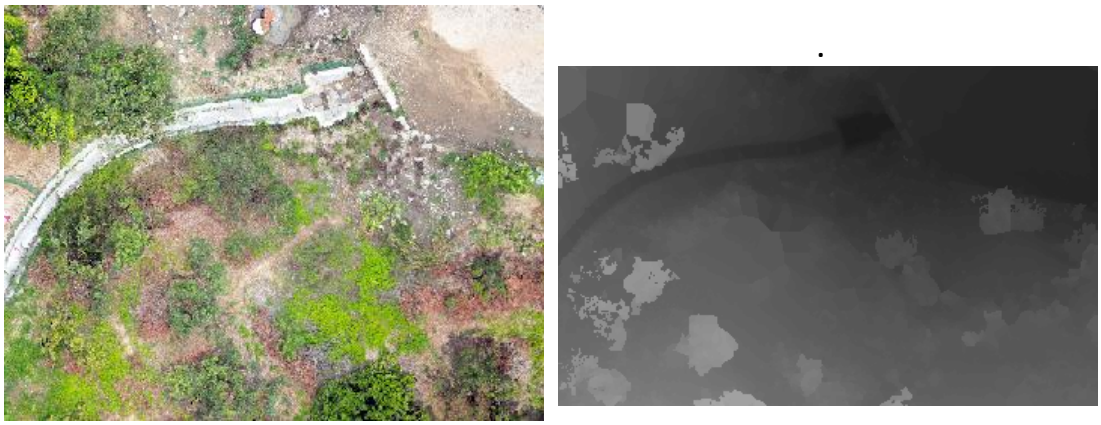
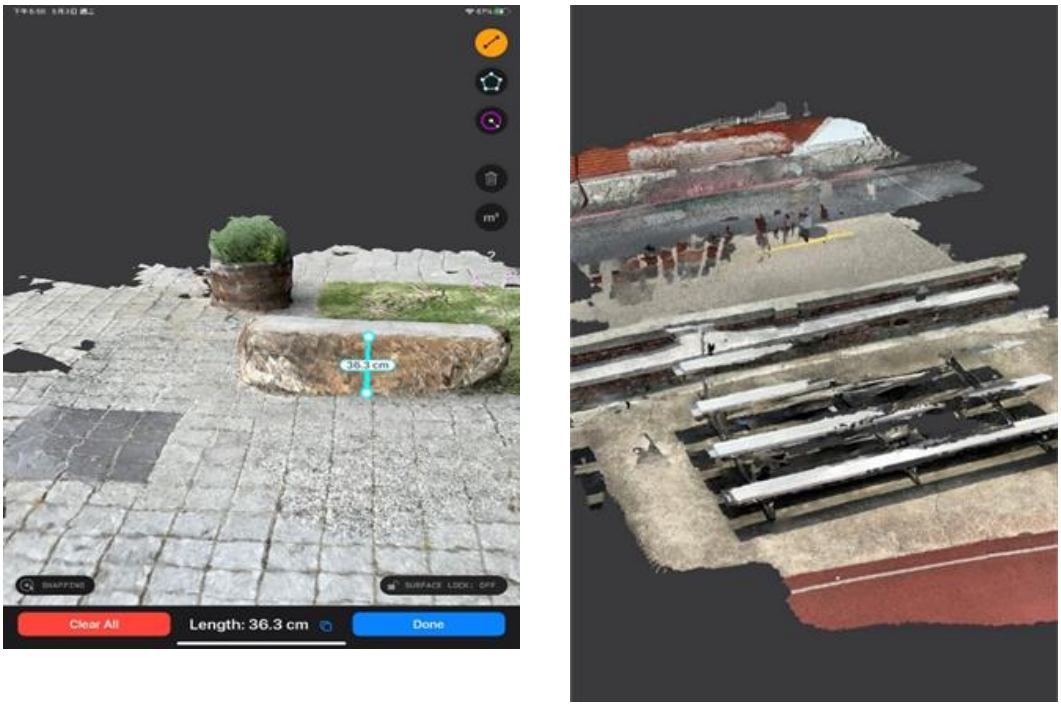


圖 4-9 無人飛行載具產製影像及數值資料

(d). 手持式 IPhone LiDAR：其優缺點及基本成果展示如下圖 4-7。

d-1 優點：攜帶方便、操作介面簡單，具有一定精度及影像呈現，能同時產製點線面及圖像成果。

d-2 缺點：測量人員仍需接近測量目標，目標物場域環境會影響成果精度，設備穩定度方面還有進步空間。



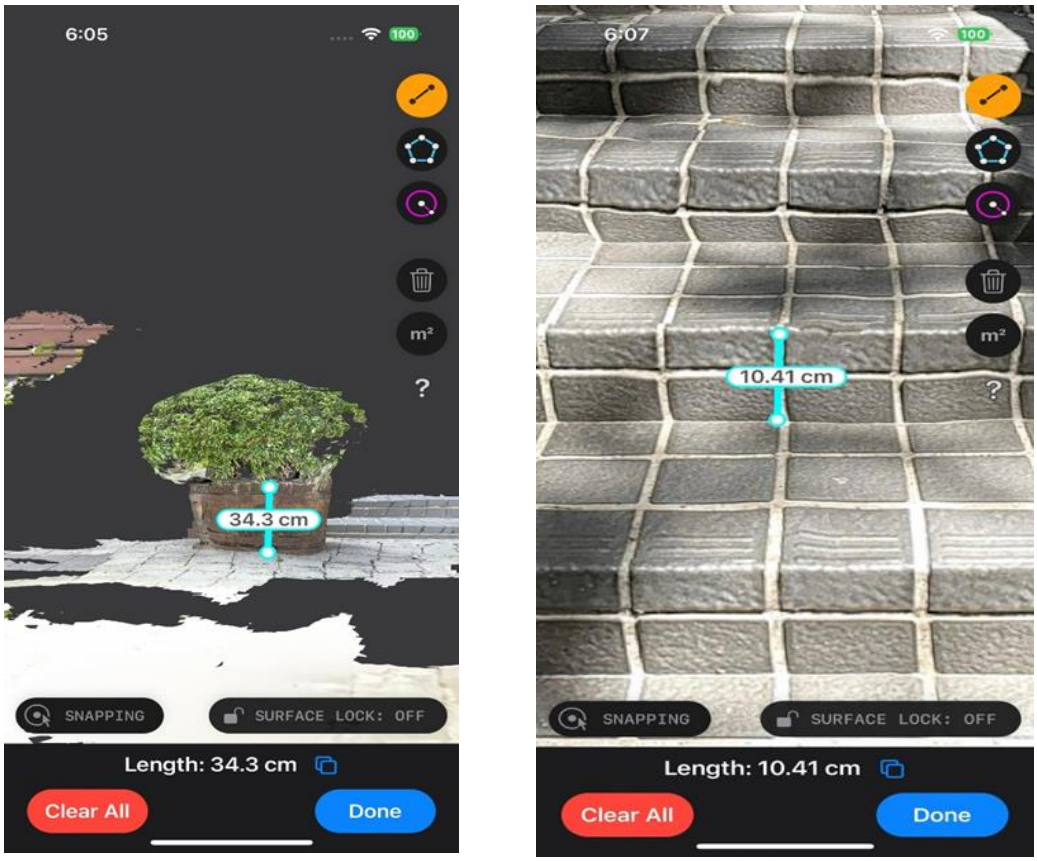
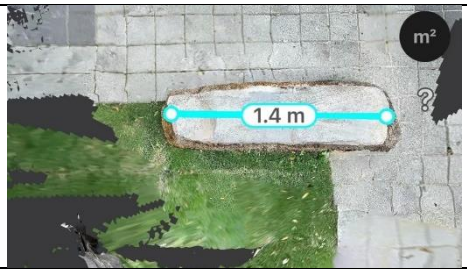


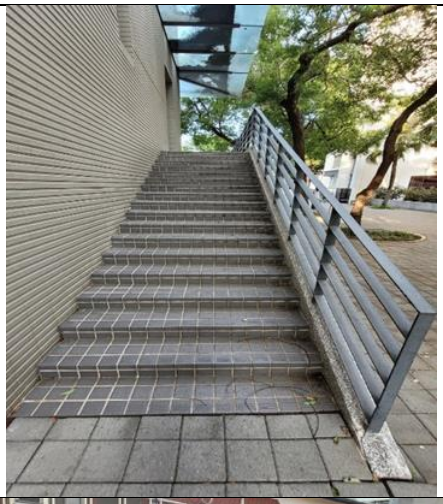
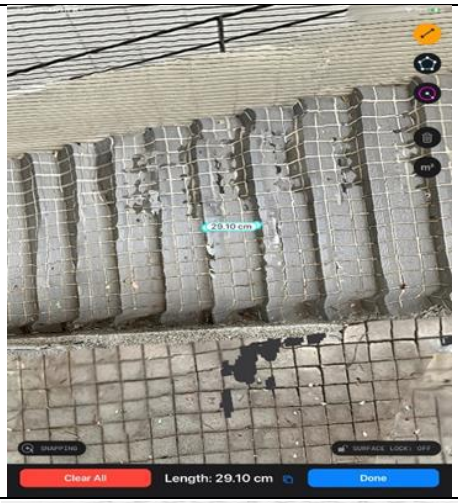
圖 4- 10 手持式 IPhone LiDAR 成像差異

(二)IPhone LiDAR 目標物樣態差異

手持式 IPhone LiDAR 在測量目標物時，會因目標物樣態差異而影響甚大，例如：網格狀物體、周遭物構造複雜及植生存在等等，而在本計畫研究下可以發現，這些情況不只影響成果數據已會直接影響成果圖像的產製，如表 4-9 中就可以明顯發現這些物體已與原本型態產生甚大的差異。

表 4-9 各型態構造物成像成果

測量物	原圖	IPhone LiDAR
單一目標		

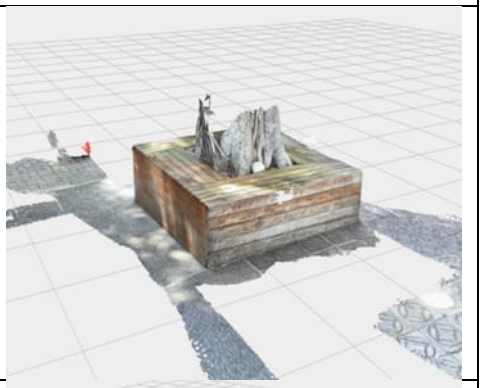
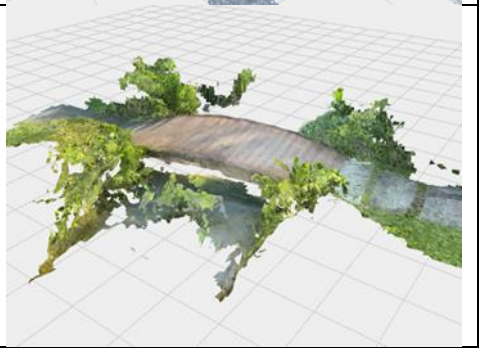
網格狀物體		
構造複雜		
植生		

(三)IPhone LiDAR 目標物環境差異

手持式 IPhone LiDAR 在測量目標物時，會因目標環境差異而影響，例如：光源、環境複雜及水面存在等等，而在本計畫研究下可以發現，這些情況不只影響成果數據已會直接影響成果圖像的產製，如表中就可以明顯發現這些物體已與原本型態產生甚大的差異，其中又以水土保持工程場域常見的地表水成項問題特別討論。

無水相較於有水的圖片較為清晰明瞭，當下水面高約 3 公分，肉眼可清晰可見下方小石塊，但 IPhone LiDAR 會因為水面反射太陽光的問題，而無法較為清晰地拍攝出底層小石塊。

表 4-10 相異環境成像表

測量物	原圖	IPhone LiDAR
光源		
複雜環境		

水面		

二、IPhone LiDAR 精度比對

本計畫研究階段可以得知，IPhone LiDAR 需環繞拍攝測量構造物方能有較佳的成像與資料數，故將成果歸納後針對構造物進行精度比對，進而一併比較出示用場域或目標物的型態，其各項比較如附件二。

單純的構造物以 IPhone 掃描較為精準，但若在構造物中還有細部構造則有顯著誤差量。

三、IPhone LiDAR 於施工中工地追蹤量測成果分析

透過 LiDAR 於施工中工地追蹤量測成果中，可以歸納出幾個分析主題，分別為掃描限制及成像成果對比、工地調查實務掃描成果精度分析及掃描成本。

(一)掃描成像成果對比

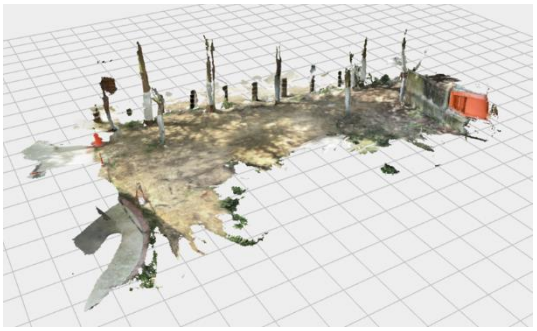
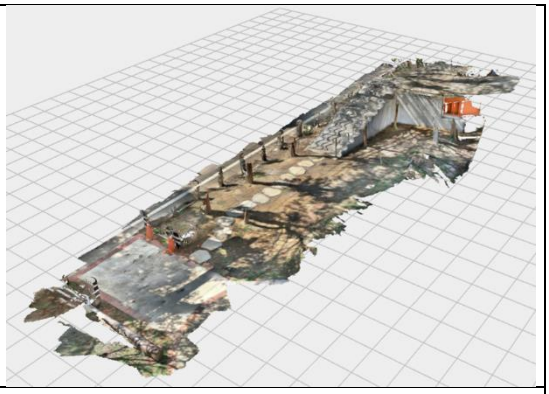
本計畫為分析手持行動裝置於工地現場之實用性，其成果大

致可以分為數化及影像，而將掃描成果與常見的影像調查設備如手機、空拍機設備進行成果比較，本計畫調查成果對比如下表 4-11 所示。

其中可以發現，手機成像雖隨著鏡頭技術不斷成熟，但其只能展示出純圖像，不利於現場數化紀錄及調查管理；空拍機成像雖具快速、清晰及大範圍數化技術，但受限於現場遮蔽或植生覆蓋等等環境因素及無法現場數化之原因，雖然穩定度高但缺發立即性；而現有的 LIDAR 技術具有輕巧、機動性及即時的數化功能，步行可達之處皆可掃描。

表 4-11 各設備之影像成果展示

影像成果	
	
手機	
	
UAV	

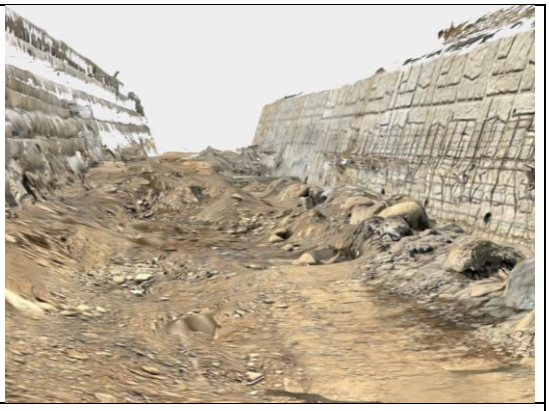



LIDAR

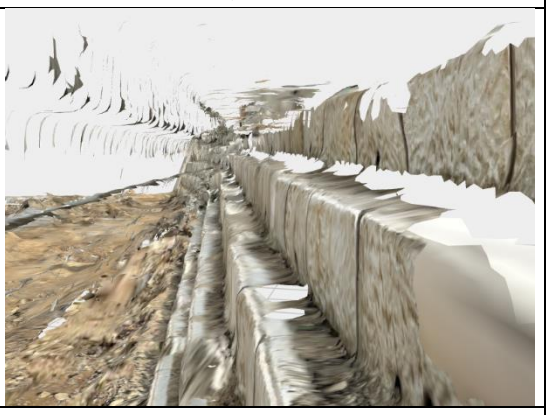
(二)LiDAR 工地掃描限制

本計畫於工地實施 LiDAR 掃描時在執行過程，有發現硬體設備上之限制，而該限制影響了成像的結果如圖 4-11 所示，1.如遇不規則表面，成像易扭曲、2. 網格型或階梯型目標物，形成分層影像、3. 鋼筋等間隙較大構造物，部分僅呈現陰影、4. 遇水面時易掃描不出成果。


不規則表面

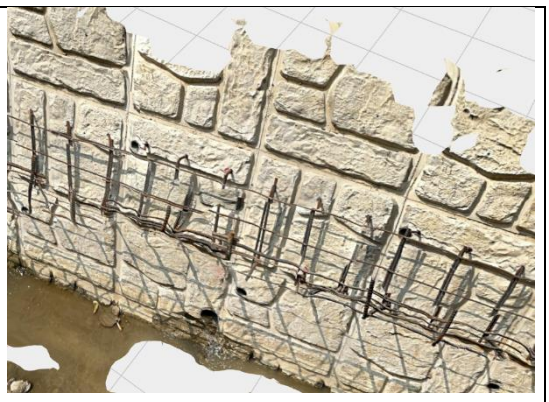

成像易扭曲


網格型或階梯型目標物


形成分層影像



鋼筋等間隙較大構造物



部分僅呈現陰影



遇水面時



易掃描不出成果

圖 4-11 掃描目標物限制之情形

(三)工地調查實務掃描成果精度分析

透過工地實務調查成果進一步分析數化精度，其調查成果(數值、精度)詳如表 4-12，其中可以發現手持式 LiDAR 技術用於掃描階高(表面美化前)如圖項目時誤差最為顯著，亦屬階梯且單一色調可能導致，表中 10 處構造物掃描成像請參見附件五。



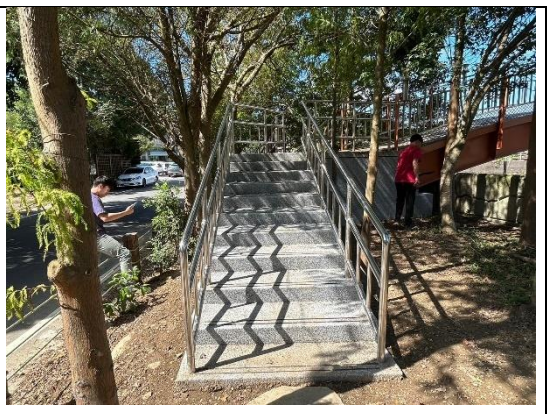


圖 4-12 階高(表面美化前)掃描成像(左)、現況(右)

另外，可以歸納出手持式 LiDAR 技術於平整構造物掃描時具有較高的精度，透過該次計畫掃描之 10 處成果中可以得知，不管 I Pad LiDAR 或是 I phone LiDAR 之掃描的平均精度誤差約為 14%。

表 4-12 工地調查實務掃描數化成果

工程名稱								
三義鄉雙潭社區香菇亭周邊環境改善工程								
目標物	階高(表面美化前)		階深(表面美化前)		階高(表面美化後)		階深(表面美化後)	
項目	數值(cm)	誤差(%)	數值(cm)	誤差(%)	數值(cm)	誤差(%)	數值(cm)	誤差(%)
設計圖說	15	-	40	-	15	-	40	-
尺規量測	16	-	40.5	-	15	-	37	-
I phone	5.51	65.56	37.9	6.42	13.82	7.87	37.6	1.62
I Pad	9.17	42.69	33.8	16.54	11.47	23.53	33	10.81
工程名稱								
寶石里 6 鄰石頭坑野溪治理工程								
目標物	預鑄塊護岸(階深)		預鑄塊護岸(階高)		預鑄塊固床工寬		護岸高	
項目	數值(cm)	誤差(%)	數值(cm)	誤差(%)	數值(cm)	誤差(%)	數值(cm)	誤差(%)
設計圖說	-	-	-	-	80	-	-	-
尺規量測	25	-	45	-	80	-	245	-
I phone	24.38	2.48	39.4	12.44	62	22.50	240	2.04
I Pad	24.51	1.96	38.6	14.22	77	3.75	240	2.04
工程名稱								
寶石里 6 鄰石頭坑野溪治理工程								
目標物	生物通道寬		固床工		I phone	I Pad		
項目	數值(cm)	誤差(%)	數值(cm)	誤差(%)	平均誤差			
設計圖說	100	-	102	-	14.85	14.69		
尺規量測	100	-	104	-				
I phone	84	16.00	92	11.54				
I Pad	84	16.00	88	15.38				

(四)掃描成本

設備除本身採購成本外，現場操作時間亦屬重要的成本考量之一，以下表為工區時做時間差異。

表 4-13 工區實作掃描時間

日期	10 月 3 日		10 月 19 日		10 月 31 日	
設備	IPhone	IPad	IPhone	IPad	IPhone	IPad
三義鄉雙潭社區香菇亭周邊環境改善工程	6 分鐘	5 分鐘	-	-	8 分鐘	8 分鐘
旱坑里 9 鄰野溪治理工程工地掃描	11 分鐘	10 分鐘	14 分鐘	14 分鐘	-	-
寶石里 6 鄰石頭坑野溪治理工程	20 分鐘	19 分鐘	21 分鐘	20 分鐘	20 分鐘	20 分鐘

第五章　資料庫建置

透過上述的掃描成果，建置用於上傳之資料庫平台，並作為展示使用。將數據的差異比對與點雲資料的數化分析後，並利用量測的成果，透過水理的檢算，進行通洪檢視與量體評估等等，最後的成果放置平台，以供檢視。相關介面如下圖所示。

藉由如圖 5-1、圖 5-2 的資料庫資料填寫介面，填寫相關調查表資料，將工程相關資訊數位化，並留存於資料庫平台裡，用以可以快速調閱資訊。



圖 5-1 資料庫表單填寫介面



圖 5-2 資料庫表單填寫介面

另外，透過圖 5-3 相關填寫介面留存，相關計畫工程所屬基本資料，並

且將 3D 掃描成果上傳後，線上瀏覽成果展示如圖 5-5、圖 5-6 可即時瀏覽相關施工圖報告書文件，如圖 5-4。



圖 5-3 工程案件列表清單介面

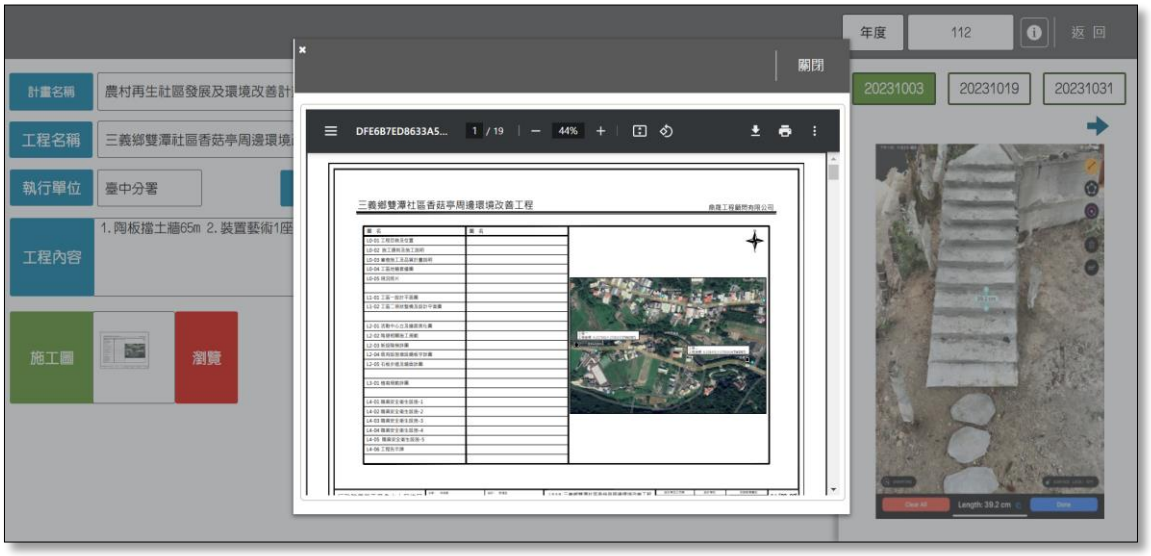


圖 5-4 資料庫平台瀏覽施工圖報告書文件

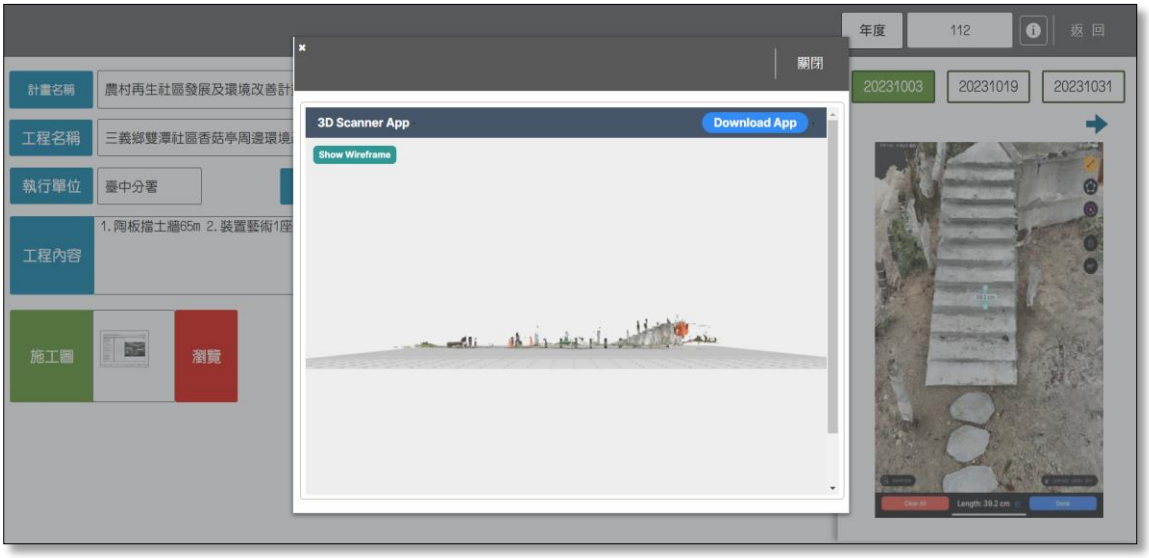


圖 5-5 資料庫平台 3D 掃描成果展示

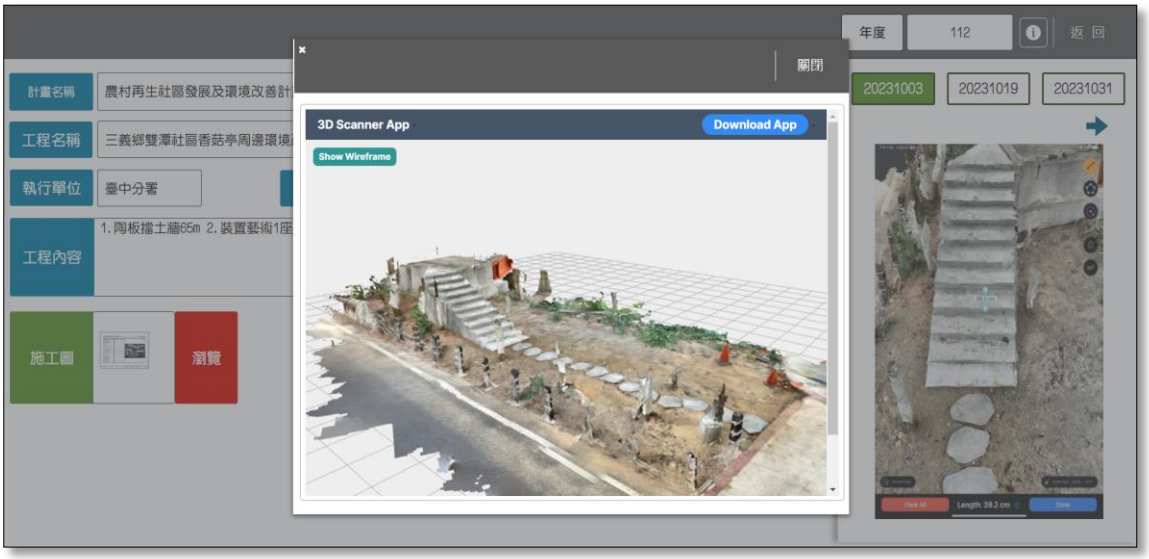


圖 5-6 資庫平台 3D 掃描成果展示

第六章 結論與建議

第一節 結論

一、 透過文獻回顧可以得知，LiDAR 技術的逐漸成熟使的該技術進一步被使用在構造物掃描，故進一步探討其實用性、成果展示及各項限制。

二、 IPhone LiDAR 測量應用可以用於工程掃描規劃針對新設工程在不同施工階段進行掃描，並針對各種尺寸與設計圖比對，如高度、長度、斜率等，並透過延伸的程度，檢視工程的進度，並利用資料庫的影像與點雲上傳成果做比對。

三、 IPhone LiDAR 掃描技術實務上會受限於 1.如遇不規則表面，成像易扭曲、2. 網格型或階梯型目標物，形成分層影像、3. 鋼筋等間隙較大構造物，部分僅呈現陰影、4. 遇水面時易掃描不出成果。

四、 可以歸納出手持式 LiDAR 技術於平整構造物掃描時具有較高的精度，透過該次計畫掃描之 10 處成果中可以得知，不管 I Pad LiDAR 或是 I phone LiDAR 之掃描的平均精度誤差約為 14%。

五、 透過上述的掃描成果，建置用於上傳之資料庫平台，並作為展示使用。將數據的差異比對與點雲資料的數化分析後，並利用量測的成果進一步追蹤工地及管理。

第二節 建議

一、 透過第四章量測成果與分析可以得知 IPhone LiDAR 量測目標能有一定的測量精度，且機體輕巧易攜帶，建議若目標物屬平整構造物則可以使用。

二、 該計畫之執行成果中可以延伸探討，雖施工中掃描可以追蹤進度，但工區構造物表面土堆及鋼筋會間接影響成像，故若提升掃描頻率，並於資料庫中檢視，更能交互比對成果之精確度。

三、 本研究所採用的手持 LIDAR 設備大配資料庫，亦可作為日後相關工程構造物之調查與量化之參考使用以及主辦單位抽查量化之使用。

參考文獻

1. 公共工程品管管理制度(民 82 年 10 月 7 日)。
2. 水土保持工程職業安全衛生機制建置，行政院農業委員會水土保持局，2015。
3. 水土保持工程職業安全衛生機制建置職業安全衛生設施預算編製參考手冊，行政院農業委員會水土保持局，2015。
4. 鍾鴻寬(2017)，iBeacon 應用在營造工地安全管理之可行性研究，健行科技大學土木工程系空間資訊與防災科技碩士班碩士論文。
5. 和南巷野溪(高市 DF071)災害復建四期工程，行政院農業委員會水土保持局臺南分局，2017。
6. 水土保持工區勞工安全科技化管理之建置先期研究，行政院農業委員會水土保持局，2018。
7. 出火橋下游野溪整治工程，行政院農業委員會水土保持局臺南分局，2019。
8. 七坑災害防治工程，行政院農業委員會水土保持局臺南分局，2019。
9. 農村發展及水土保持署推行參與勞動部職業安全衛生優良公共工程選拔作業指南 (https://taipei.swcb.gov.tw/Safety/show_detail?id=d1eda9d90df44cd2a3f18e774e6c89ca)
10. 農村發展及水土保持署頒定營造施工高風險安衛項目檢查表 (https://taipei.swcb.gov.tw/Safety/show_detail?id=d1eda9d90df44cd2a3f18e774e6c89ca)
11. 「蘋果仁」(https://applealmond.com/posts/107030)

附件一、審查意見回覆

期中審查意見回覆

審查意見	處理情形
1. 貴校所提期中報告書，經書面審查通過，同意撥付第 2 期款，審查意見請納入期末報告書回應，並於 112 年 11 月 13 日前函送期末報告書 5 份，俾利辦理期末審查作業。	團隊將依機關規定時間，函送期末報告書 5 份，俾利辦理期末審查作業。
2. 請補[摘要]，列出計畫目的、工作項目、至期中完成項目、獲致之初步成果、具體建議及解決對策。	遵照辦理，團隊依機關規定之文書版面排版。
3. 水土保持於內文或標題多簡稱為[水保]，但行政院環境保護署水質保護處，其相關組織或業務亦簡稱[水保]，此對水土保持從業人員其敘述不會混淆，但正式文書應用[水土保持]，勿予簡化，請全面檢視修正。	遵照辦理，將簡稱[水保]全面檢視，修正為[水土保持]。
4. 內文錯漏字甚多，應全面詳細檢查修正，使文意通暢清晰。例如但者[這]些、UAV 的操作(成國?)資訊獲得的重要工具、5 到[道]光、智慧手機中的(3 至於)?dToF 則是…、坦[探]討、時[實]驗等。	遵照辦理，團隊將全面檢視修正內文錯漏字。
5. 引用之圖表應放大成可閱讀之大小，而非僅呈示意圖。	遵照辦理，於期末報告中調整圖表成可閱讀之大小。
6. 手機之發展日新月異，其升級間隔期程越發縮短，據悉 IPhone15 預計 9 月推出，其他廠牌亦應推出新機，請於期末蒐	本團隊將其手機新功能規格補充至期末報告中，以利各型號對比。

審查意見	處理情形
集新功能予以比對，尋求較佳運用。	
7. 第二章第二節有關 iToF、dToF 之功能敘述與比較，雖抄錄各廠牌型錄或各科普資料，但仍需整合，例如 P21-23 內文，整段複製出現於其前後文，造成閱讀不便及觀念混淆。	遵照辦理，本團隊將各出處資料加以整合，以利閱讀及呈現。
8. 本案研究目標為[利用手持行動裝置輔助水保工地之三維空間調查與智能管理]，第三章量測設備僅敘述 UAV、全站儀，應加強說明手持行動裝置之功能、需求。	本團隊將於期末報告中補充說明手持行動裝置之功能、需求及限制。
9. P63 量測速度以 20cm/s、40cm/s、60cm/s 三種變因，其速度如何量測、率定，若僅以圖示腳步大小，即定義為速度大小，其實驗之可信度存疑。	本團隊已以更嚴謹及符合實用實務的定義，針對其便因加以實驗。
10. 請比較 IPhone、IPad 性能之差異，以印證 p71 兩者誤差率。	兩者本身硬體規格已有差異，故兩者成果上亦有差異，則其差異分析於期末報告中呈現。
11. 依表 4-1 顯示，IPhone、IPad 量測誤差最高達 17%，且量測距離限縮於 1 公尺以內，可見其應用性不足，請再以較嚴謹之實驗方式，探討應用於工地之可行性。	尤其成果展示中可以得知，該技術於複雜表面及諸多情境下實屬應用性不足，其討論於期末報告中補充說明。
12. 第五章資料庫建置之管考系統已由署本部建置完成，無須再另創新系統。	亦可呈現各公其進度之成果，以利工程實務使用。
13. 至期中階段應著重手持行動裝置輔助水保工地之三維空間調查評估成果、應用性，報告內容嚴重	於期末報告中補充與期末工地實際調查成果一同展示，並同時分析操作實際利弊。

審查意見	處理情形
缺漏，應予補充。	
14. 本計畫研發手持行動裝置輔助工程構造物調查與智能管理，可快速簡易瞭解現地構造物情形。	若將追蹤資料存放置資料庫則能方便構造物巡查及調查管理。
15. 可先建議本項技術使用時機及目的，對於如何更能精確掌握實際狀況，判斷更正確構造物巡查成果，再請持續研發精進相關工作或技術。	時機及目的為構造物完成進度之追蹤使用，能直接透過掃描成果馬上觀測尺寸及影像。
16. 執行單位於期末報告書撰寫時,相關報告書封面及內文格式,請配合機關改制修正之。	遵照辦理，報告書將依照機關改制修正。
17. P.49 本計畫選用之 UAV 為 DJI 公司產品,請減災監測組協助確認本案是否能使用中國製無人機。	已確認，將誤植不符合計畫核可之空拍機介紹修正。
18. P.37 倒數第 7 行「無人機」誤植重複,請修正。	遵照辦理，已將誤植文字修正。
19. 第五章資料庫建立:本署已另有工程管考系統,相關工程勘查表填報均於系統上填報| 產製;另數位化 360 環景部分工程管考系統亦已完成此功能(供設計團隊上傳後產製 QRcode),建議本章移除。	由於掃描成果性質屬影像及數化資料，實務操作及資料彙整時仍需彙整至資料庫型態較能方便資料採集及展示，亦能以既有系統外部連結方式連動。
20. IPhone LiDAR 量測方案部分: (一) P46-47 有關 LiDAR 用雷射二極體部分內文,大多由「蘋果仁」網站內複製出來 且並未標示出處,是否侵權?(https://applealmond.com/posts/107030),本報告書其餘內文是否有同樣情形,請團隊再檢視。	(一) 關於引用文獻部分，團隊於期末報告時會加以核對並標記出處 (二) 關於工程現地量測時的有效掃描距離，於期末報告時成果中進行分析展示。

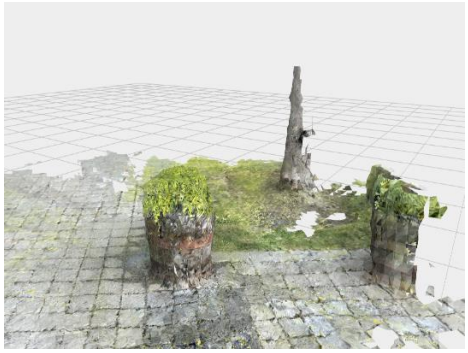
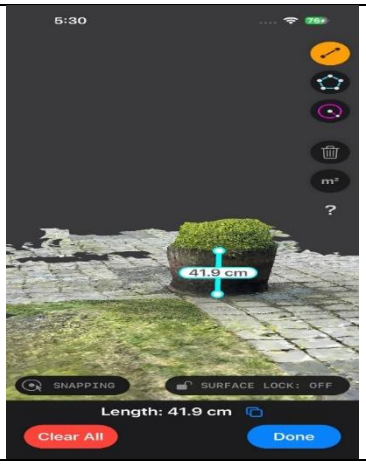
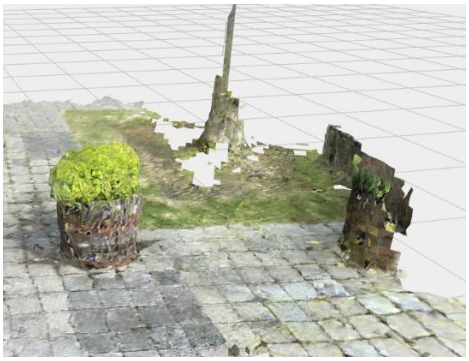
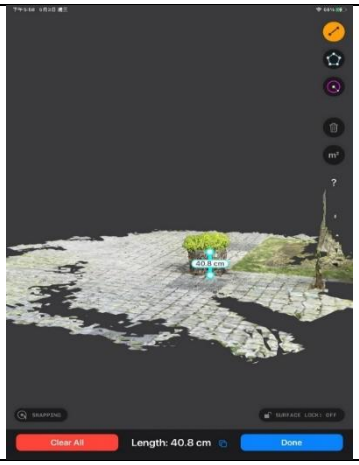
審查意見	處理情形
（二） 距離量測部分,量測距離最遠建議距離亦請團隊研究。另配合水保工程現地使用情況,建議團隊於 P.82 處標註與構造物之距離。	
21. 為因應機關組織改造，機關名稱修正為「農業部農村發展及水土保持署」,報告書封面及內文等請依本署最新範本格式撰寫，相關範本檔案請至本署電子圖書管理中心下載(https://elibrary.ardswc.gov.tw/)	遵照辦理，相關格式將依本署最新範本格式撰寫。

期末審查意見回覆

審查意見	處理情形
一、 建議可延續研究用於構造物巡檢用途，減少巡檢困難度。	感謝委員對此技術的肯定，提升監造與監督者對現地的掌握與資訊化的管理實屬重要，但是精度上與製作方法可配合不同構造物建立掃描與快速測量的SOP,數位數據資訊是需要靠多時期累計。
二、 簡單便宜之工具使用，工程人員可廣泛應用於工地現場作業與紀錄。	目前,因為人手一機,可透過IOS 及 ANDROID 系統之可攜帶設備進行快速掃描，相對門檻低,人人可以做到,公家機關要求下去更不是門檻,因此,建立工程現場作業的操作可被廣泛應用，但相對的，管理機關應該要求自主檢核依據與數量以達追蹤抽查之參考。
三、 水保工程現地條件常不利於LiDAR使用,應說明如何克服及限制。	目前 LIDAR 所建置的數值地形，可以透過點雲的密集度增加,有機會穿透樹林,針對地面進行量測，無論地面Lidar 或是空載 Lidar 皆能達成目的，本次研究是另一種的輔助測量,但是,對於隱蔽部分的量測，則可利用透地雷達等技術進行補充，但勢必要做共同基準的校正，如RTK GPS 校正，此時，量測資訊才能利用不同精度的量測工具進行輔助，也能透過影像的輔助，補充對現地的幾何資訊了解。

審查意見	處理情形
四、 有沒有考慮到人為操作的方式產生誤差？	感謝委員的提醒，此部分在進行一開始試驗時，以建立共同的量測方式與速度，並且挑選市面上常用的解析軟體，以克服誤差。此外，有有發現在不同天氣條件下，無論是 UAV 或手持 LIDAR 也會影響成果，因此量測的影像拍攝速度也是關鍵，一般 UAV 控制在 1-3 m/hr，LIDAR 則控制重疊率 50%以上，如護岸擋土牆之類，每 10 公尺約 3-5 min，重疊率以軟體設定，約 50-70%，如 P58 以後之第三章說明。
五、 量測精度是否確定與其他儀器比較？	此案量測以全測站、UAV、一般用尺與 LIDAR 所建構的影響整合量測，相關設備請參考第三章說明。

附件二、IPhone 與 IPad 的 LiDAR 測量結果

<table>
<tr><td colspan="3">原圖</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>時間: 下午 3 點
物品: 木製花盆
尺寸: 高 46.5 cm
誤差百分率:
(量測尺寸-原尺寸)/原尺寸
(絕對值)</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPhone</td></tr>
<tr><td></td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 木製花盆
尺寸: 高 41.9 cm
誤差百分率: 9%</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPad</td></tr>
<tr><td></td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 木製花盆
尺寸: 高 40.8 cm
誤差百分率: 12%</td></tr>
<tr><td colspan="3">精準度: IPhone > IPad</td></tr>
</table>

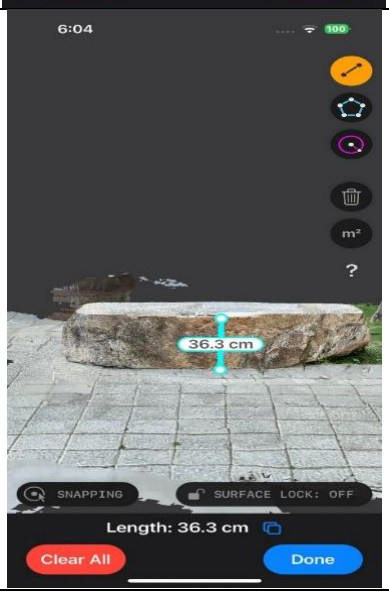
<table>
<tr><td colspan="3">原圖</td></tr>
<tr><td rowspan="3"></td><td></td><td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#1
尺寸: 長 146 cm
誤差百分率:
(量測尺寸-原尺寸)/原尺寸
(絕對值)</td></tr>
<tr><td></td><td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#1
尺寸: 寬 39 cm

誤差百分率:
(量測尺寸-原尺寸)/原尺寸
(絕對值)</td></tr>
<tr><td></td><td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#1
尺寸: 高 40 cm

誤差百分率:
(量測尺寸-原尺寸)/原尺寸
(絕對值)</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPhone</td></tr>
</table>

<table>
<tr>
<td rowspan="3">
</td>
<td>
</td>
<td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#1
尺寸: 長 140 cm

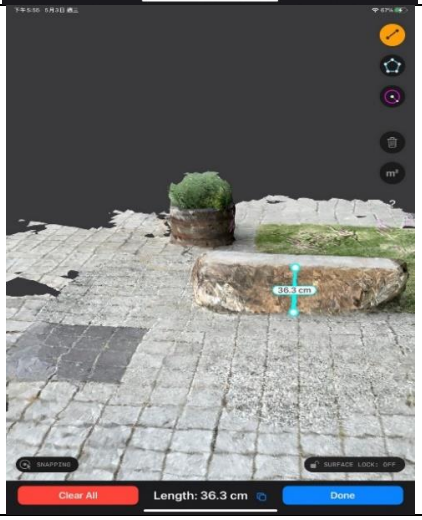
誤差百分率: 4%</td>
</tr>
<tr>
<td>
</td>
<td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#1
尺寸: 寬 37.7 cm

誤差百分率: 3%</td>
</tr>
<tr>
<td>
</td>
<td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#1
尺寸: 高 36.3 cm

誤差百分率: 9%</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">IPad</td>
</tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="3"></td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#1
尺寸: 長 140 cm

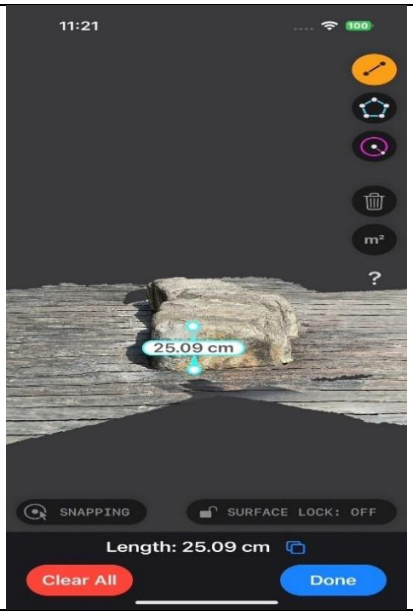
誤差百分率: 4%</td></tr>
<tr><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#1
尺寸: 寬 30.3 cm

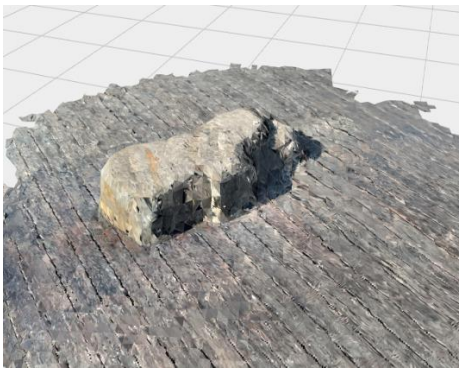
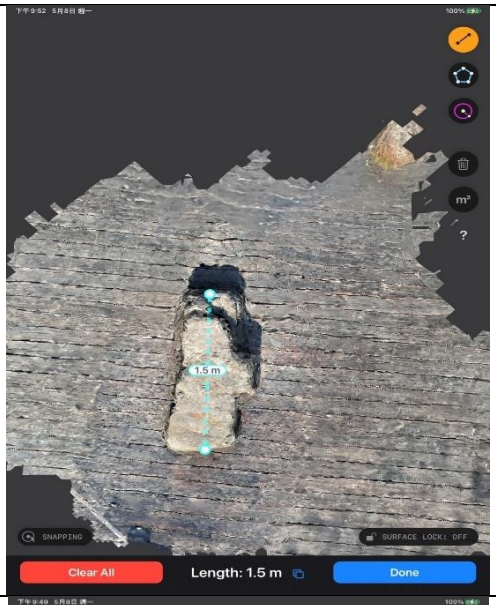
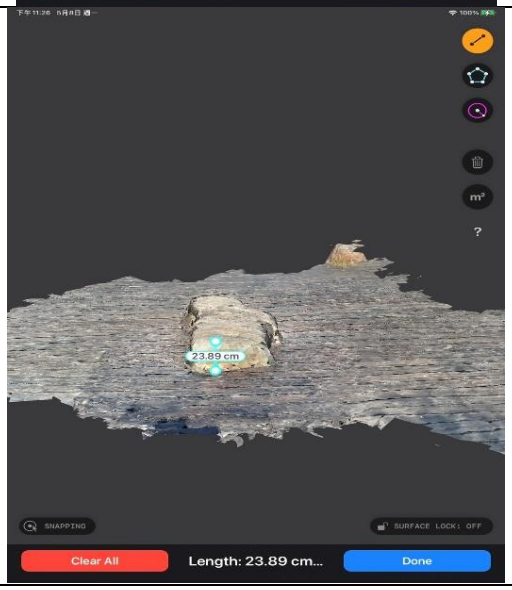
誤差百分率: 7%</td></tr>
<tr><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#1
尺寸: 高 36.3 cm

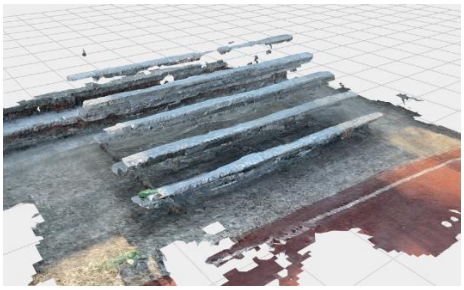
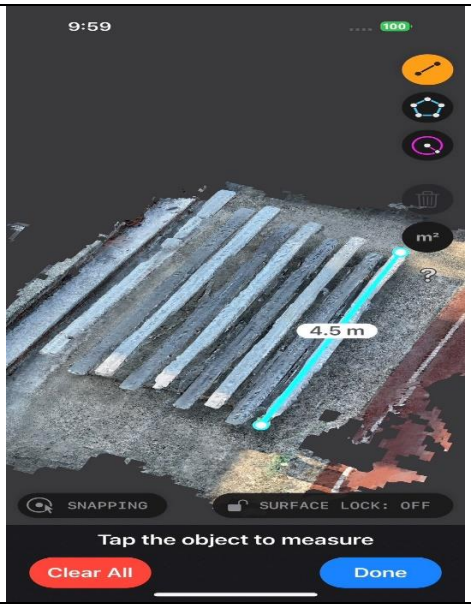
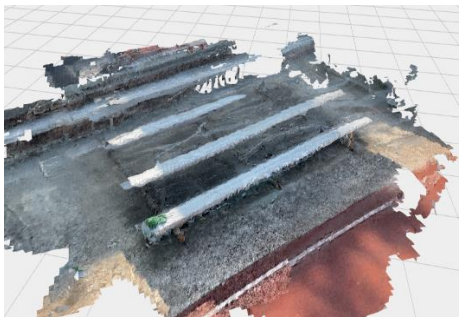
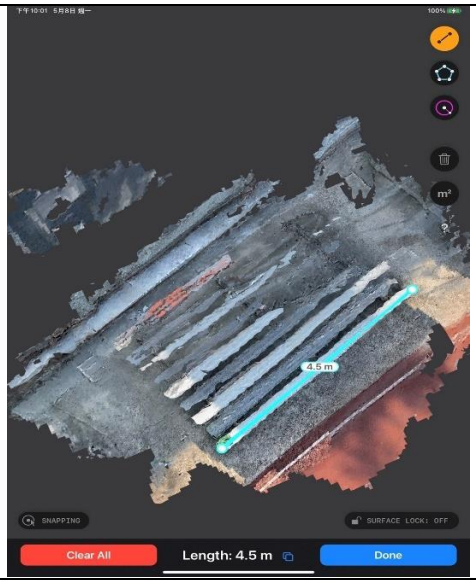
誤差百分率: 9.3%</td></tr>
<tr><td colspan="3">精準度: IPhone > IPad</td></tr>
</table>

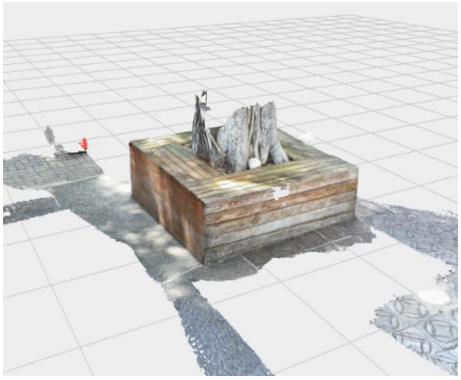
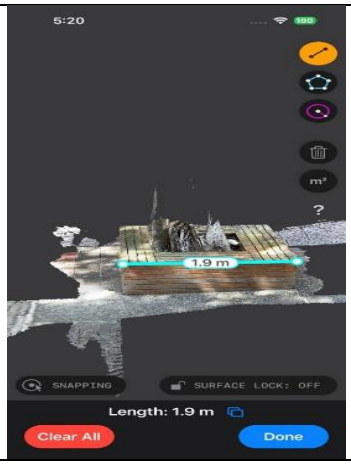
<table>
<tr><td colspan="3">原圖</td></tr>
<tr><td rowspan="3"></td><td></td><td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#2
尺寸: 長 150cm

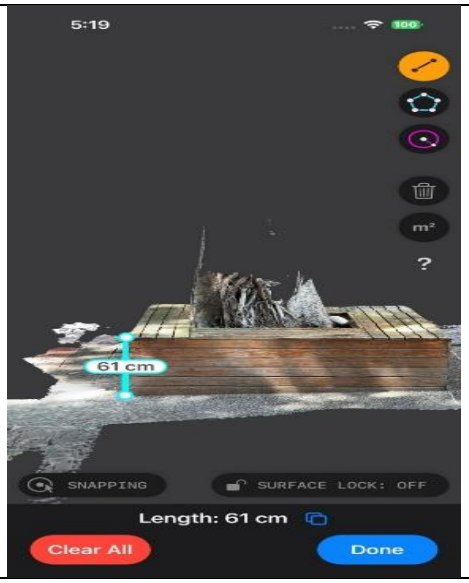
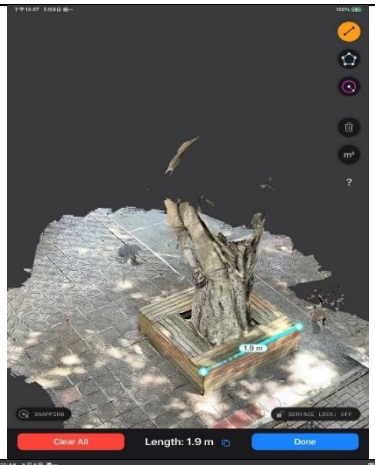
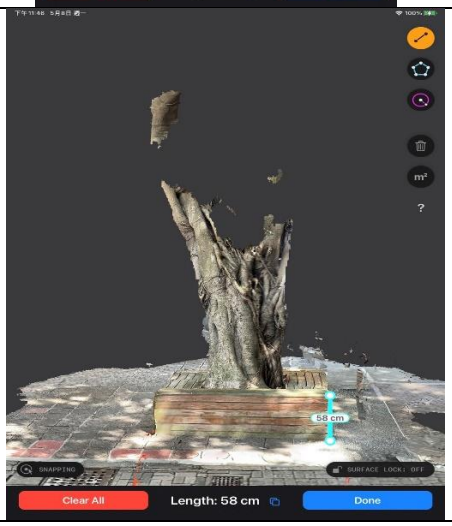
誤差百分率:
(量測尺寸-原尺寸)/原尺寸
(絕對值)</td></tr>
<tr><td></td><td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#2
尺寸: 寬 60 cm
誤差百分率:
(量測尺寸-原尺寸)/原尺寸
(絕對值)</td></tr>
<tr><td></td><td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#2
尺寸: 高 29 cm
誤差百分率:
(量測尺寸-原尺寸)/原尺寸
(絕對值)</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPhone</td></tr>
</table>

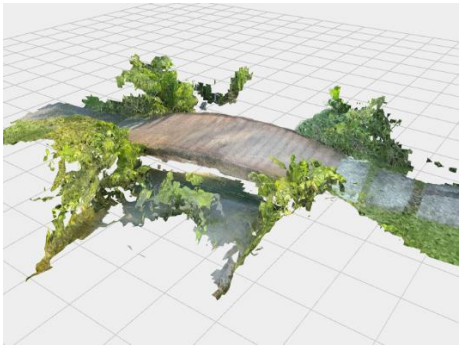
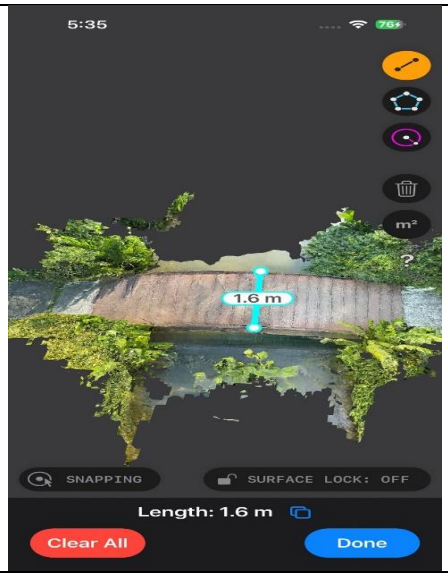
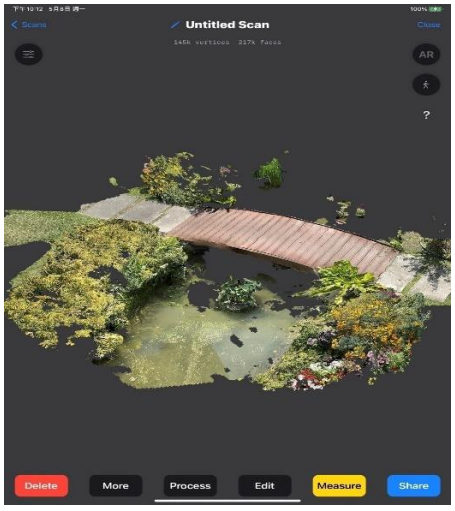
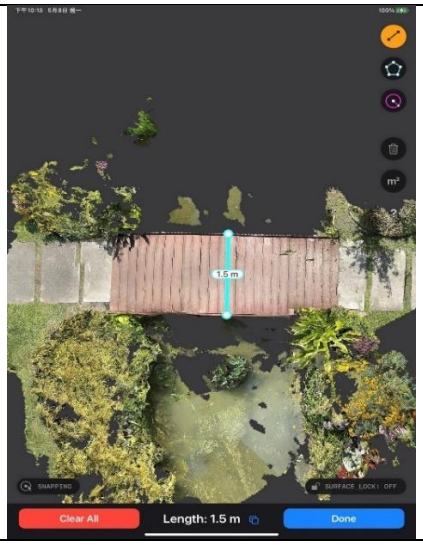
<table>
<tr>
<td rowspan="3"></td>
<td>
</td>
<td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#2
尺寸: 長 150 cm
誤差百分率: 0%</td>
</tr>
<tr>
<td>
</td>
<td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#2
尺寸: 寬 63 cm
誤差百分率: 5%</td>
</tr>
<tr>
<td>
</td>
<td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#2
尺寸: 高 25.09 cm
誤差百分率: 13.4%</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">IPad</td>
</tr>
</table>

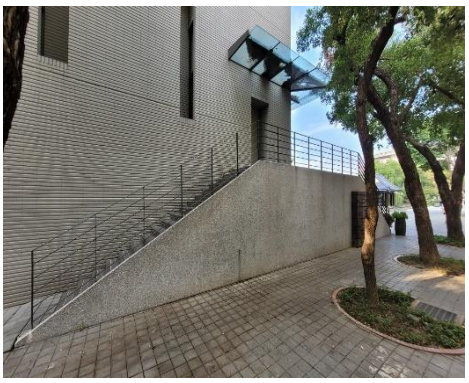
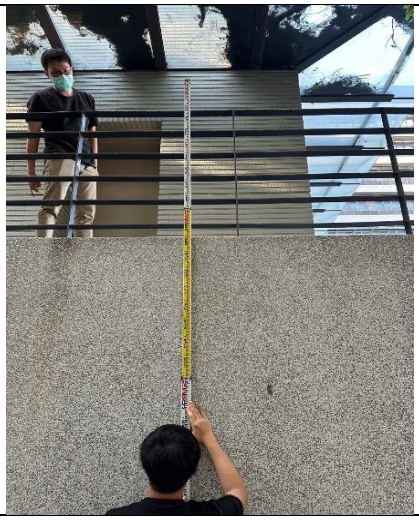
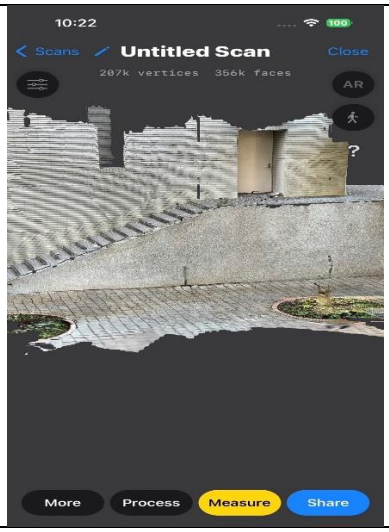
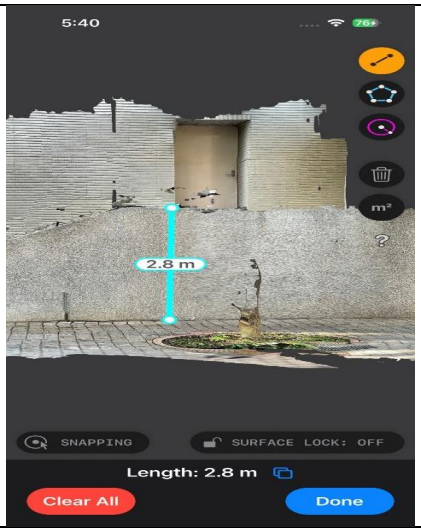
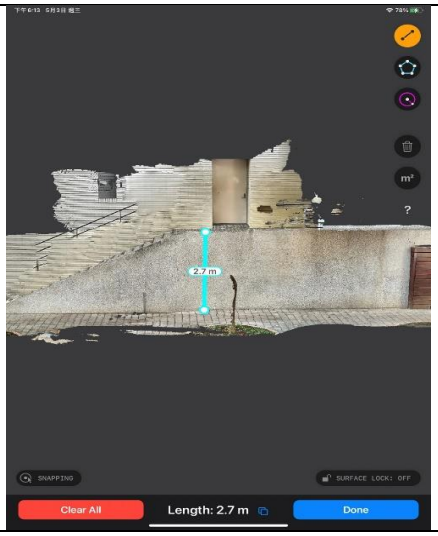
<table>
<tr><td rowspan="3"></td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#2
尺寸: 長 150 cm
誤差百分率: 0%</td></tr>
<tr><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#2
尺寸: 寬 56 cm
誤差百分率: 6.7%</td></tr>
<tr><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅#2
尺寸: 高 23.89 cm
誤差百分率:
17.6%</td></tr>
<tr><td colspan="3">精準度: IPhone > IPad</td></tr>
</table>

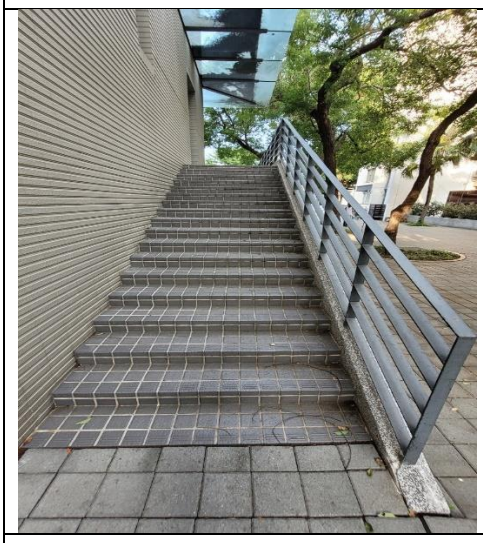
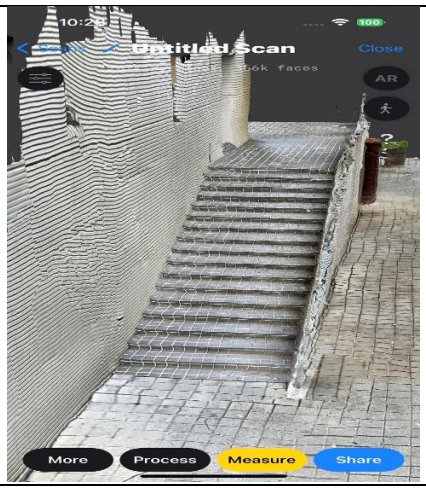
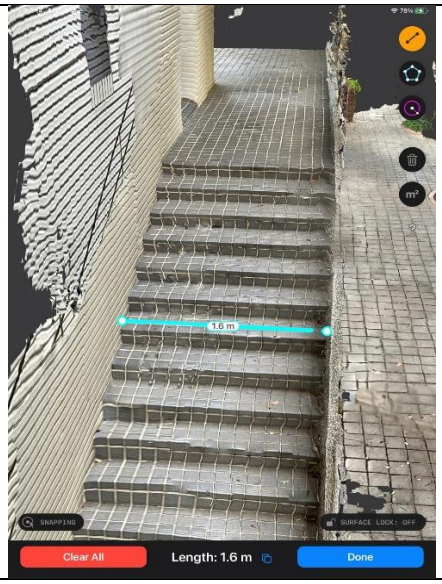
<table>
<tr><td colspan="3">原圖</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>時間: 下午 3 點
物品: 鐵製座椅
尺寸: 長 458 cm
誤差百分率:
(量測尺寸-原尺寸)/原尺寸
(絕對值)</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPhone</td></tr>
<tr><td></td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 鐵製座椅
尺寸: 長 450 cm
誤差百分率: 1.7%</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPad</td></tr>
<tr><td></td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 鐵製座椅
尺寸: 長 450 cm
誤差百分率: 1.7%</td></tr>
<tr><td colspan="3">精準度: IPhone = IPad</td></tr>
</table>

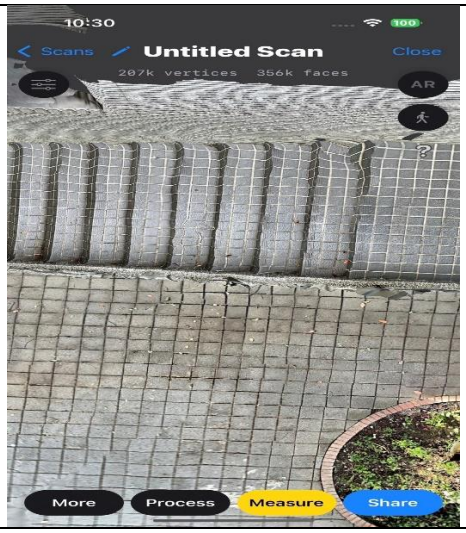
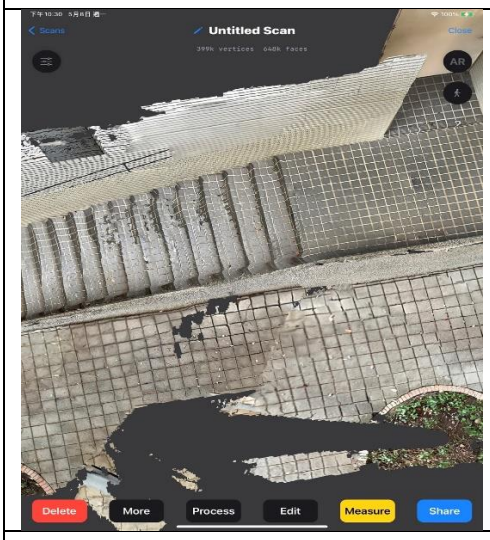
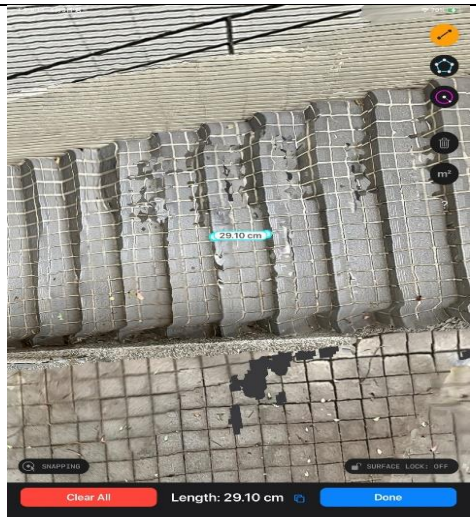
<table>
<tr><td colspan="3">原圖</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td></td><td>時間: 下午 3 點
物品: 木頭座椅
尺寸: 長 195cm
誤差百分率:
(量測尺寸-原尺寸)/
原尺寸
(絕對值)</td></tr>
<tr><td></td><td>時間: 下午 3 點
物品: 石頭座椅
尺寸: 高 62cm
誤差百分率:
(量測尺寸-原尺寸)/
原尺寸
(絕對值)</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPhone</td></tr>
<tr><td></td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 木頭座椅
尺寸: 長 190 cm
誤差百分率: 2.6%</td></tr>
</table>

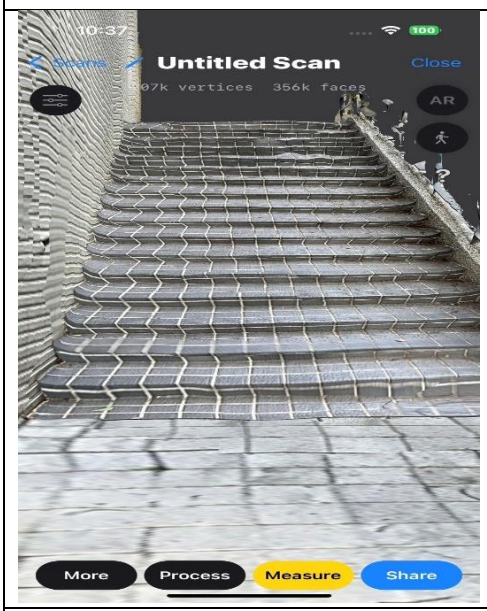
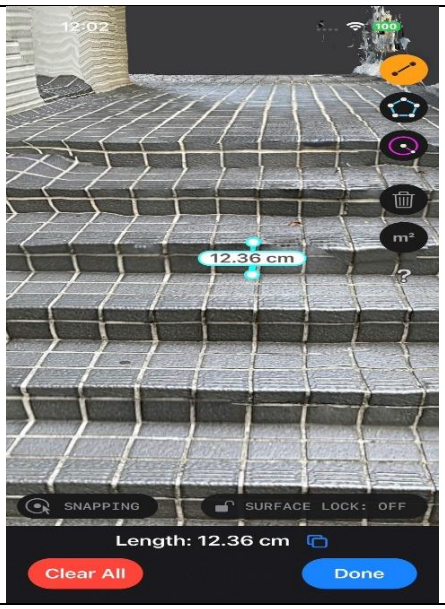
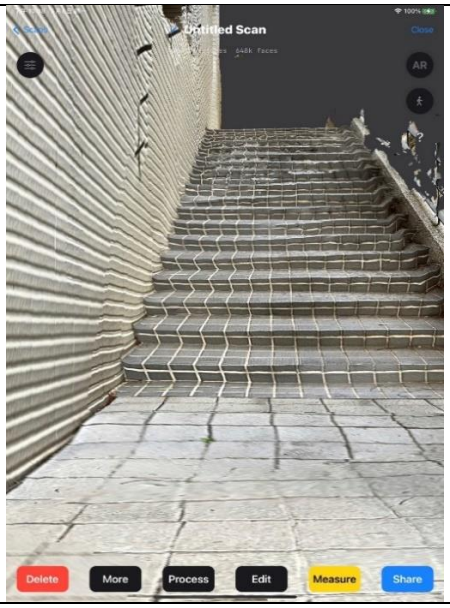
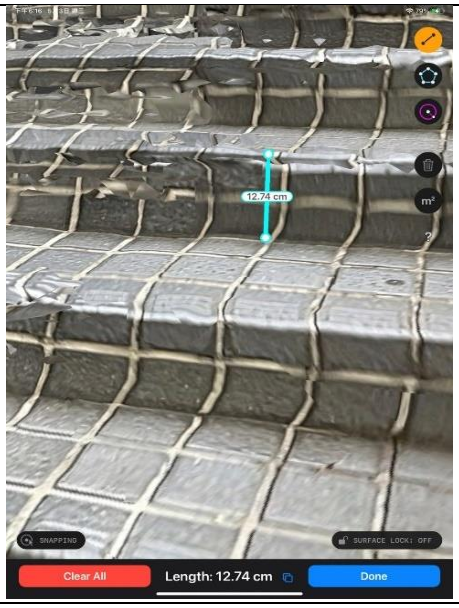
<table>
<tr><td rowspan="2"></td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 木頭座椅
尺寸: 高 61 cm
誤差百分率: 1.6%</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPad</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 木頭座椅
尺寸: 長 190 cm
誤差百分率: 2.6%</td></tr>
<tr><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 木頭座椅
尺寸: 高 58 cm
誤差百分率: 6.5%</td></tr>
<tr><td colspan="3">精準度: IPhone > IPad</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="3">原圖</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>時間: 下午 3 點
物品: 橋梁
尺寸: 長 161cm
誤差百分率:
(量測尺寸-原尺寸)/原尺寸
(絕對值)</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPhone</td></tr>
<tr><td></td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 橋梁
尺寸: 長 160 cm
誤差百分率: 0.6%</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPad</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 橋梁
尺寸: 長 150 cm
誤差百分率: 5.6%</td></tr>
<tr><td colspan="3">精準度: IPhone > IPad</td></tr>
</table>

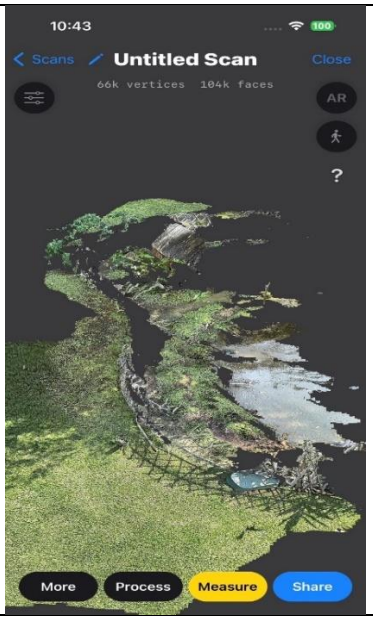
原圖		
		時間: 下午 3 點 物品: 樓梯側面 尺寸: 高 281cm 誤差百分率: (量測尺寸-原尺寸)/原尺寸 (絕對值)
IPhone		
		時間: 下午 3 點 物品: 樓梯側面 尺寸: 高 280cm 誤差百分率: 0.4%
IPad		
		時間: 下午 3 點 物品: 樓梯側面 尺寸: 高 270cm 誤差百分率: 3.9%
精準度: IPhone > IPad		

<table>
<tr><td colspan="3">原圖</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>時間: 下午 3 點
物品: 階梯
尺寸: 長 163cm
誤差百分率:
(量測尺寸-原尺寸)/原尺寸
(絕對值)</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPhone</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 階梯
尺寸: 長 160cm
誤差百分率: 1.8%</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPad</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 階梯
尺寸: 長 160cm
誤差百分率: 1.8%</td></tr>
<tr><td colspan="3">精準度: IPhone = IPad</td></tr>
</table>

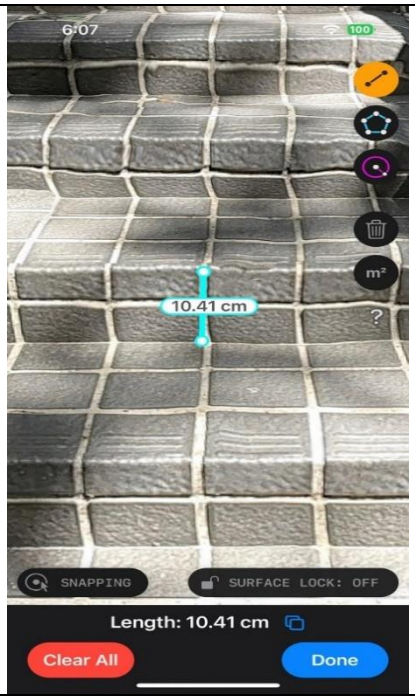
<table>
<tr><td colspan="3">原圖</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>時間: 下午 3 點
物品: 階梯
尺寸: 寬 29cm
誤差百分率:
(量測尺寸-原尺寸)/
原尺寸
(絕對值)</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPhone</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 階梯
尺寸: 寬 28.24cm
誤差百分率: 2.6%</td></tr>
<tr><td colspan="3">IPad</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td><td>時間: 下午 3 點
物品: 階梯
尺寸: 寬 29.1cm
誤差百分率: 0.3%</td></tr>
<tr><td colspan="3">精準度: IPhone < IPad</td></tr>
</table>

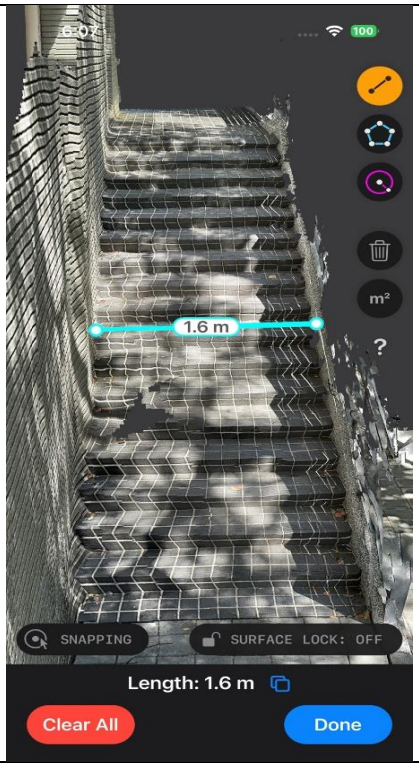
原圖		
		時間: 下午 3 點 物品: 階梯 尺寸: 高 14cm 誤差百分率: (量測尺寸-原尺寸)/原尺寸 (絕對值)
IPhone		
		時間: 下午 3 點 物品: 階梯 尺寸: 高 12.36cm 誤差百分率: 11.7%
IPad		
		時間: 下午 3 點 物品: 階梯 尺寸: 高 12.74cm 誤差百分率: 9%
精準度: IPhone < IPad		

較難掃描 (深度較深、有反光、會透光)

原圖	IPhone	IPad
		

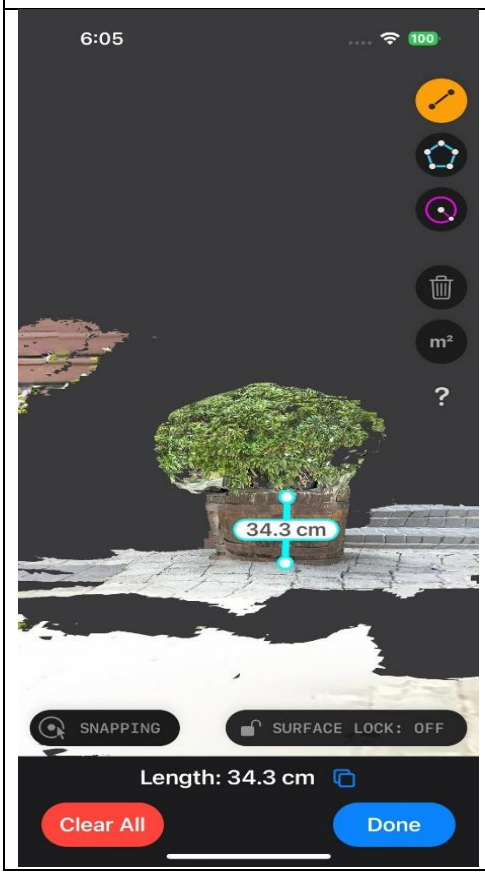
附件三、IPhone LiDAR 精度比對

<table>
<tr><td>
</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">14cm 相差 4cm 誤差率: 28.5%</td></tr>
<tr><td>
</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">29cm 相差 9cm 誤差率:31%</td></tr>
</table>





163cm 相差 3cm 誤差率:1.8%





44cm 相差 9.7cm 誤差率:22%



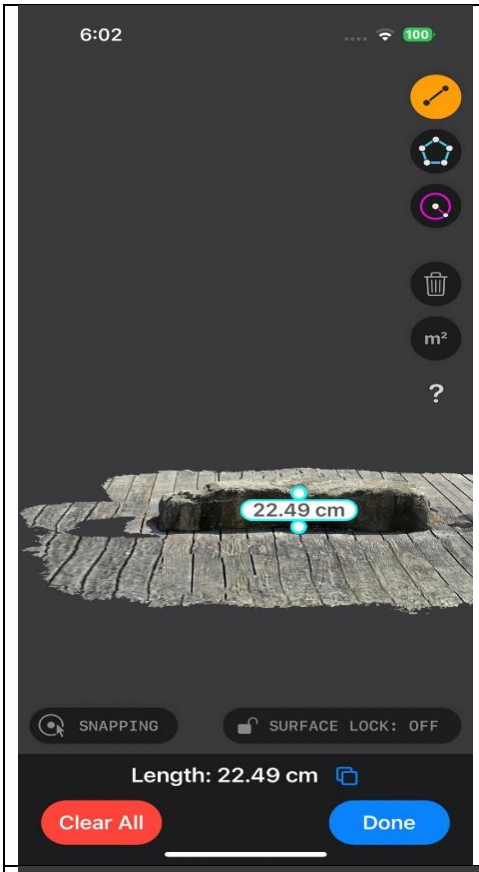


39cm 相差 4.2cm 誤差率:10.7%





140cm 相差 0cm 誤差率:0%



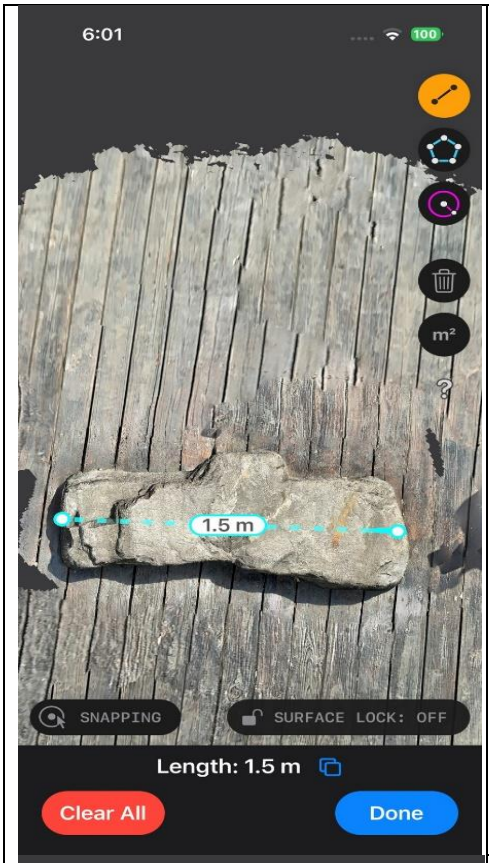


30cm 相差 7.51cm 誤差率:25%





60cm 相差 3cm 誤差率:0.05%



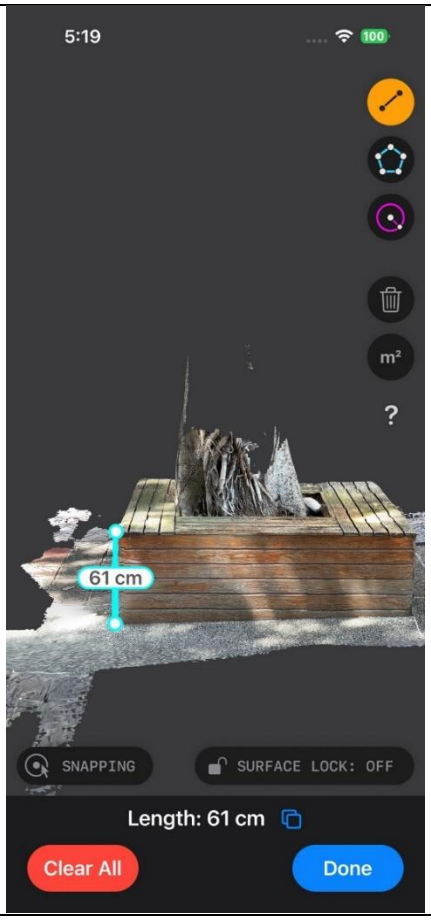
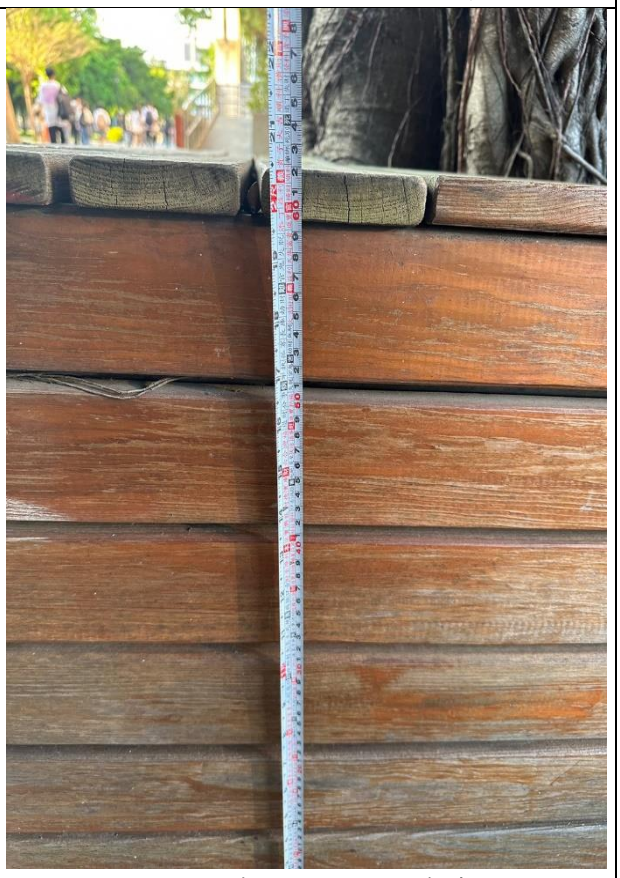


150cm 相差 0cm 誤差率:0%

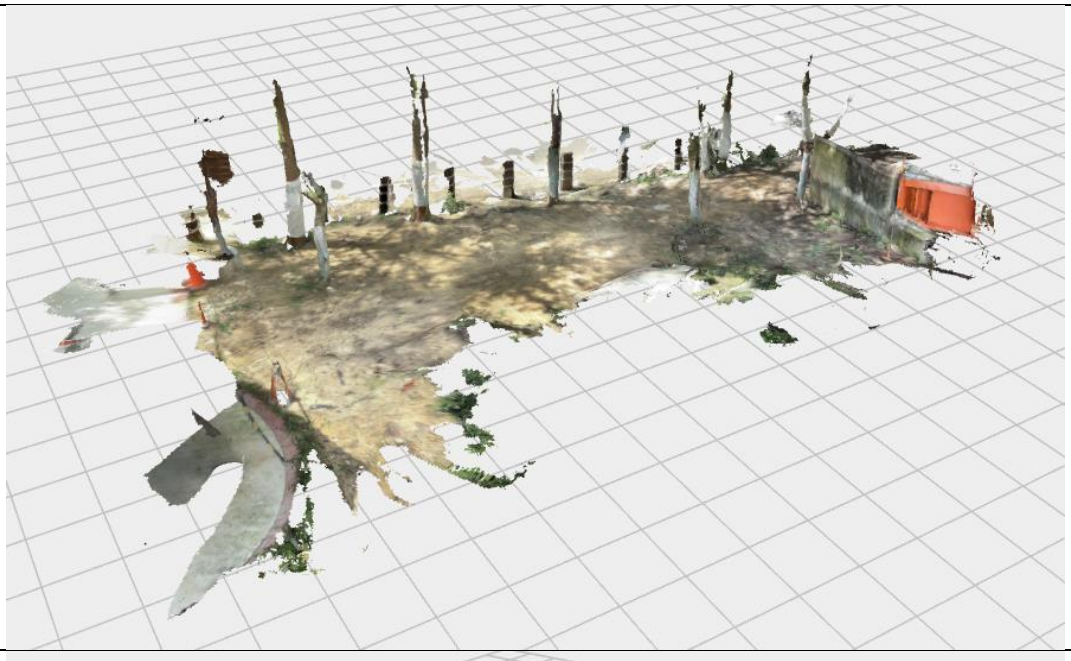
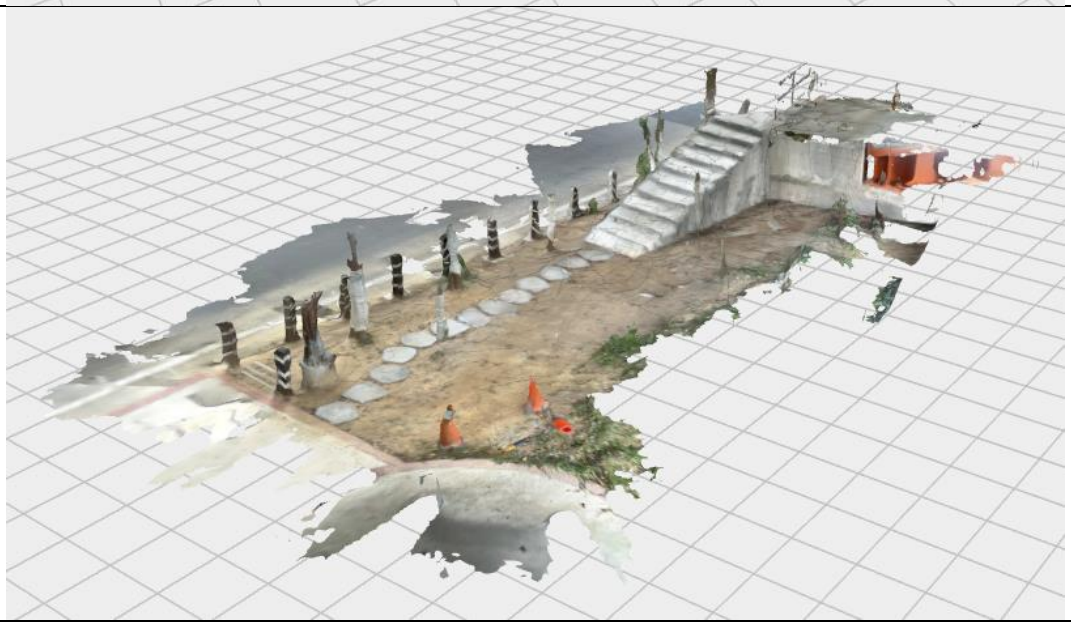


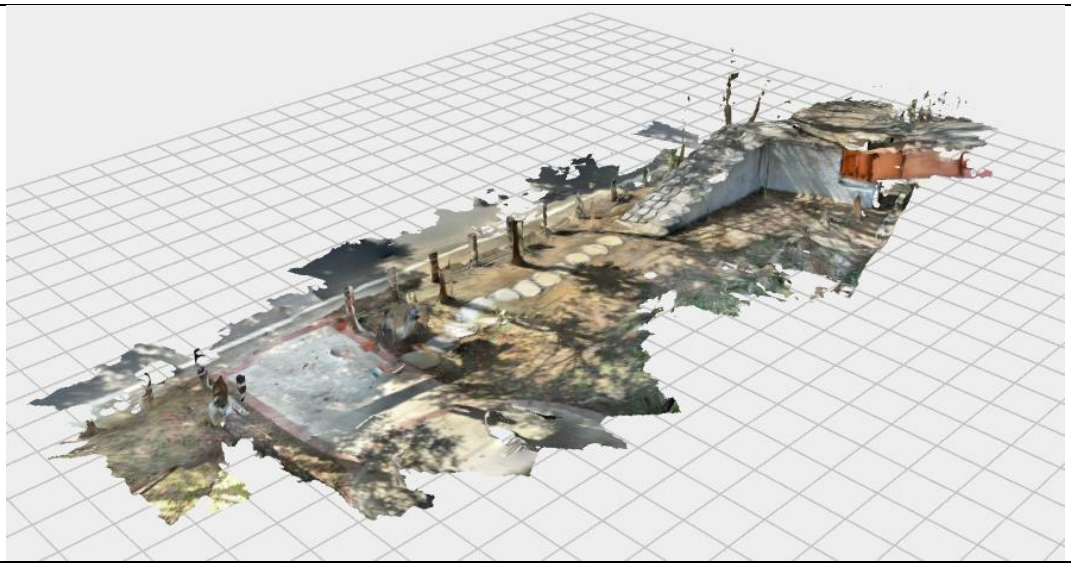
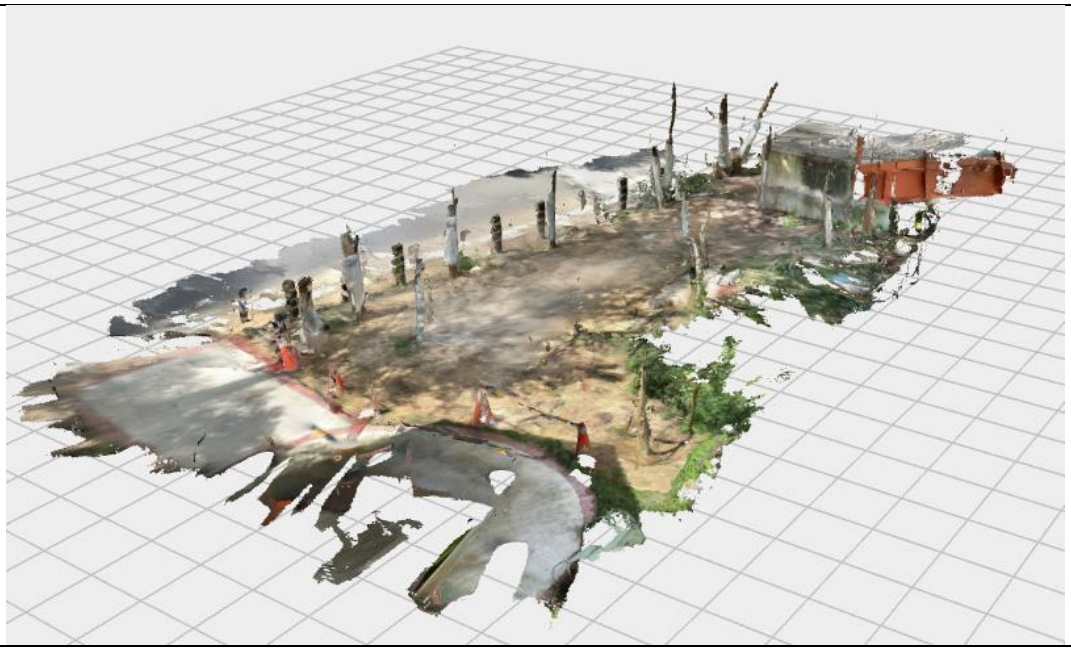


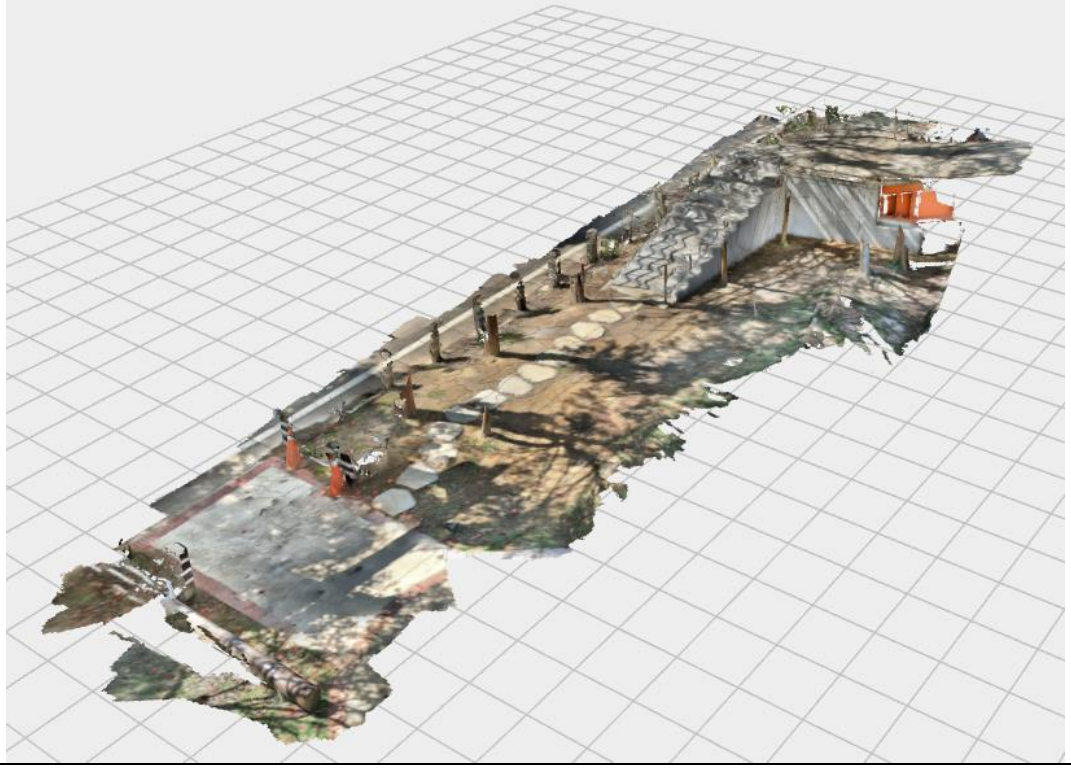
195cm 相差 5cm 誤差率:2.5%

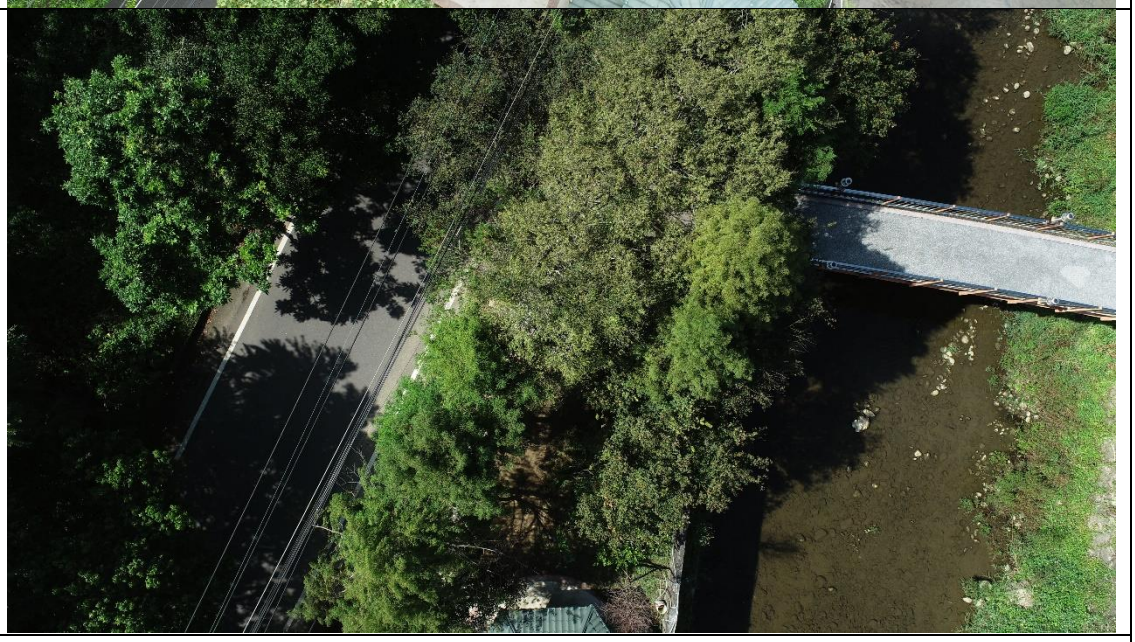
<table>
<tr>
<td>
</td>
<td>
195cm 相差 5cm 誤差率:2.5%</td>
</tr>
<tr>
<td>
</td>
<td>
62cm 相差 1cm 誤差率:1.6%</td>
</tr>
</table>

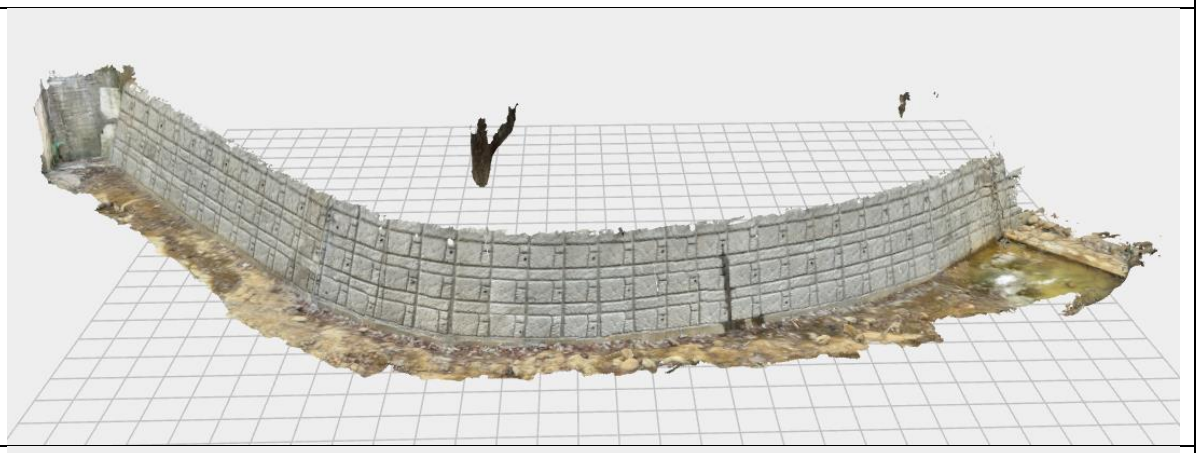
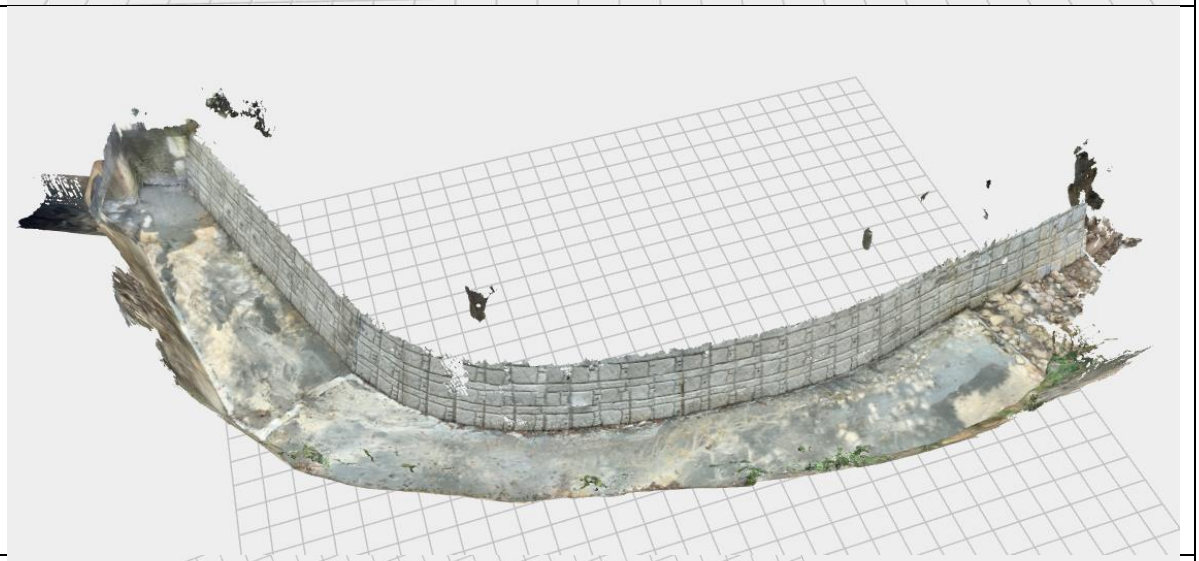
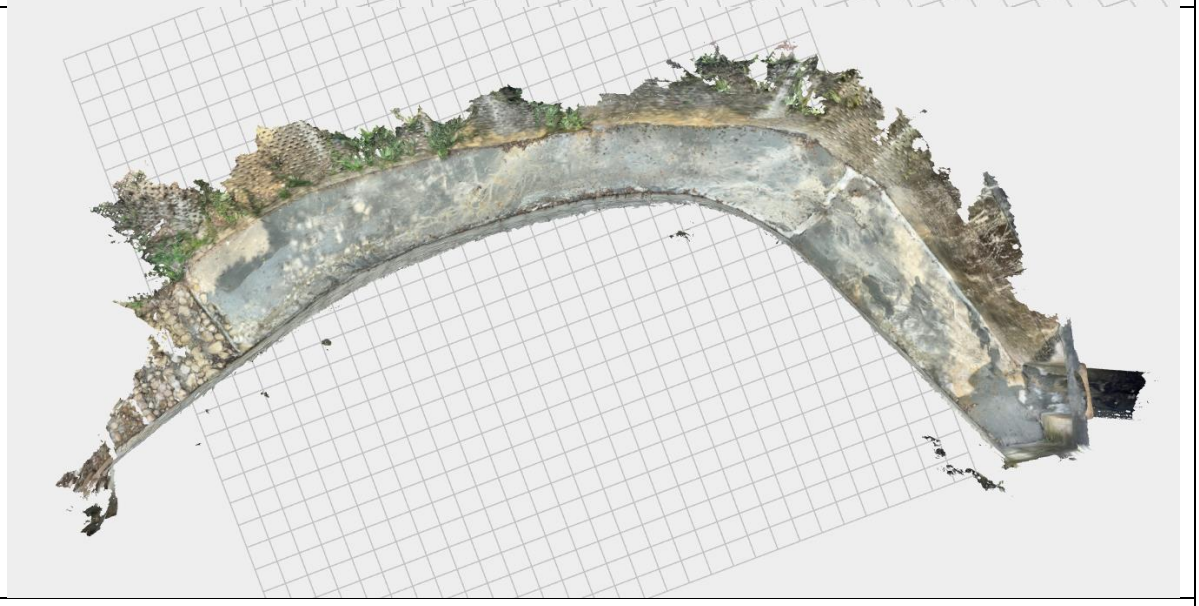
附件四、工區各進度現況掃描

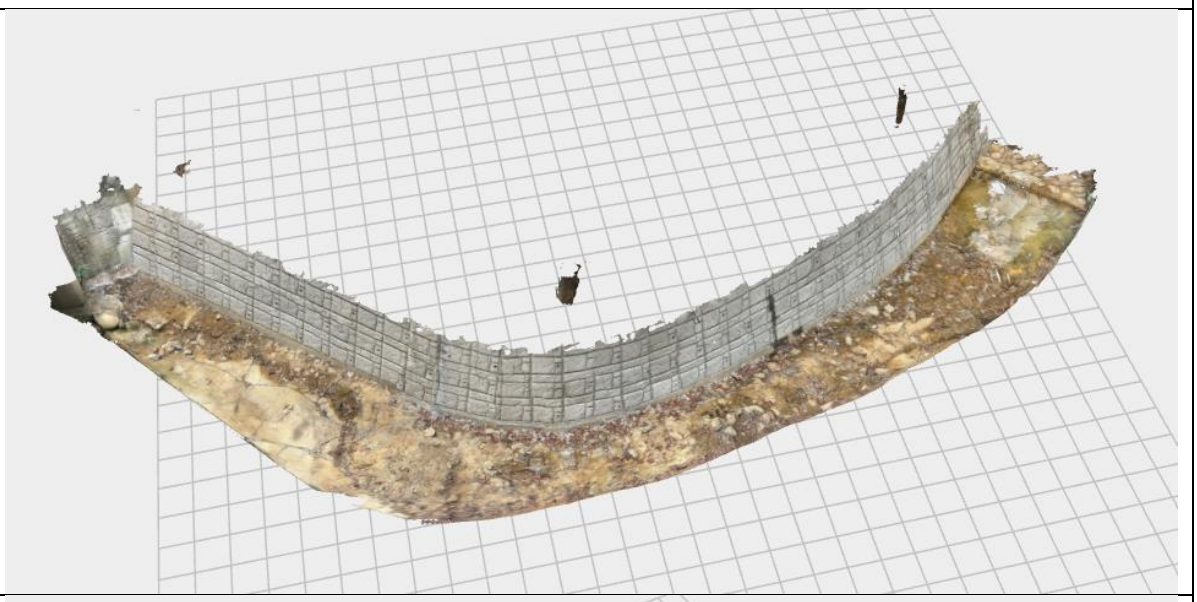
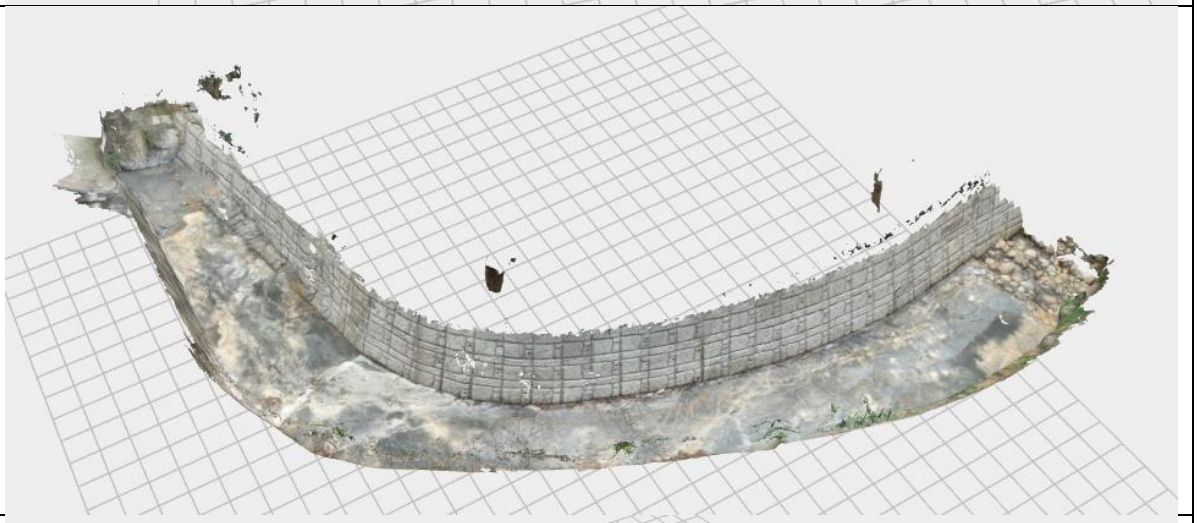
三義鄉雙潭社區香菇亭周邊環境改善工程	
日期/ 進度(%)	成果影像
112/08/23 33%	
112/10/03 68%	

112/10/31 88%	
IPhone 掃描成果	
日期/ 進度(%)	成果影像
112/08/23 33%	

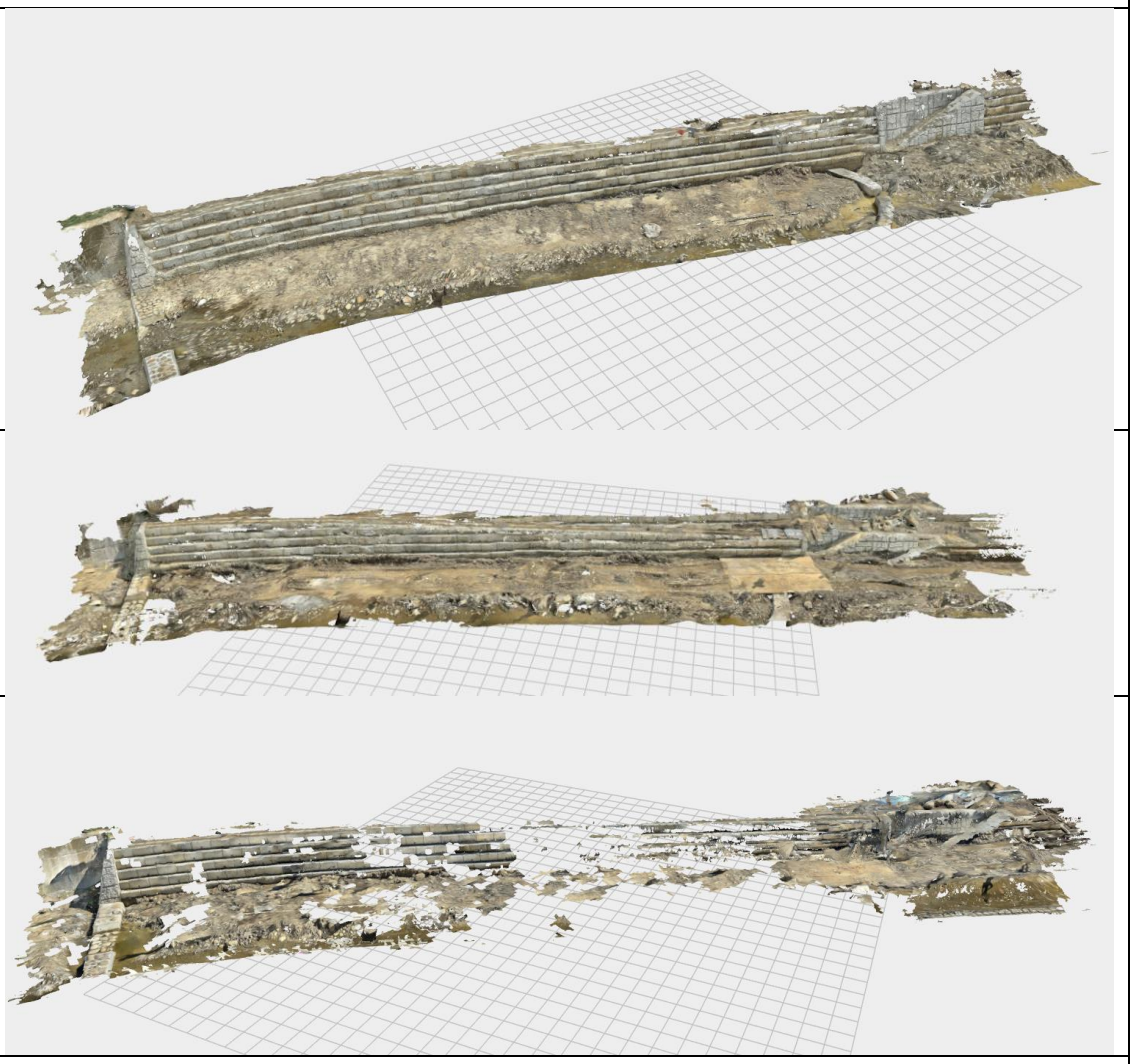
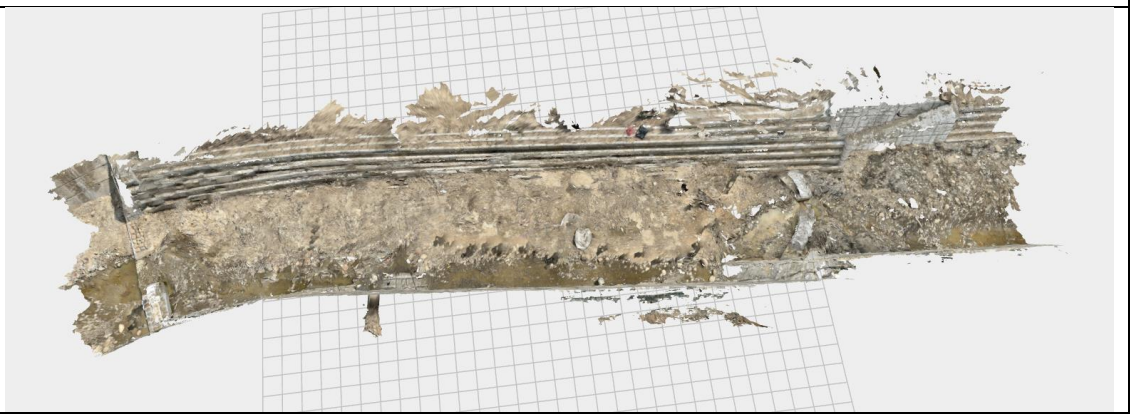
112/10/03 68%	
112/10/31 88%	
IPad 掃描成果	
日期/ 進度(%)	成果影像

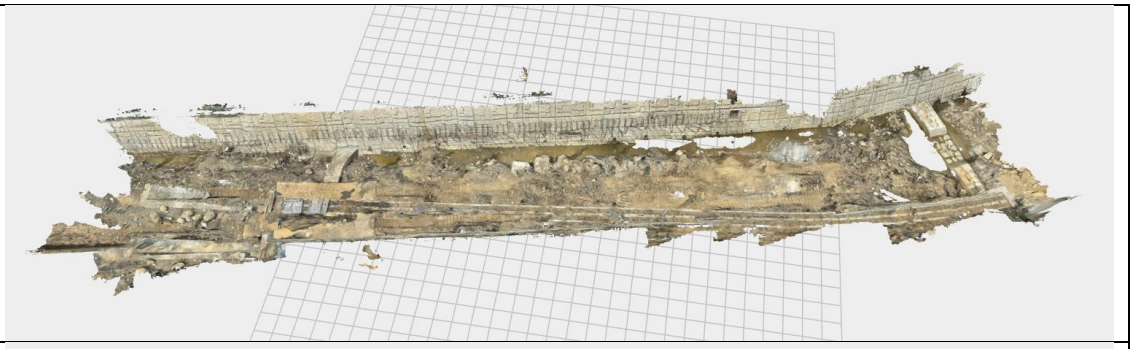
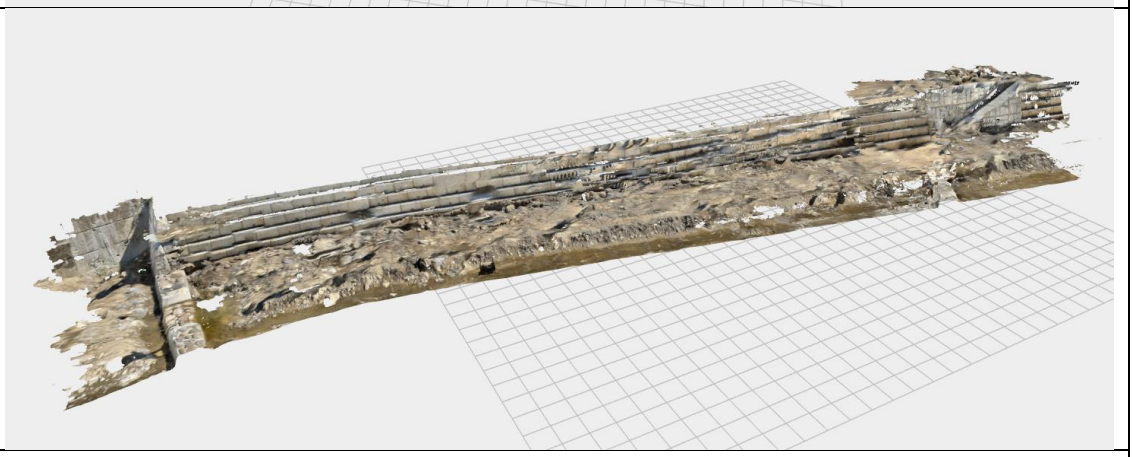
112/10/03 68%	
112/10/31 88%	
空拍機 掃描成果	

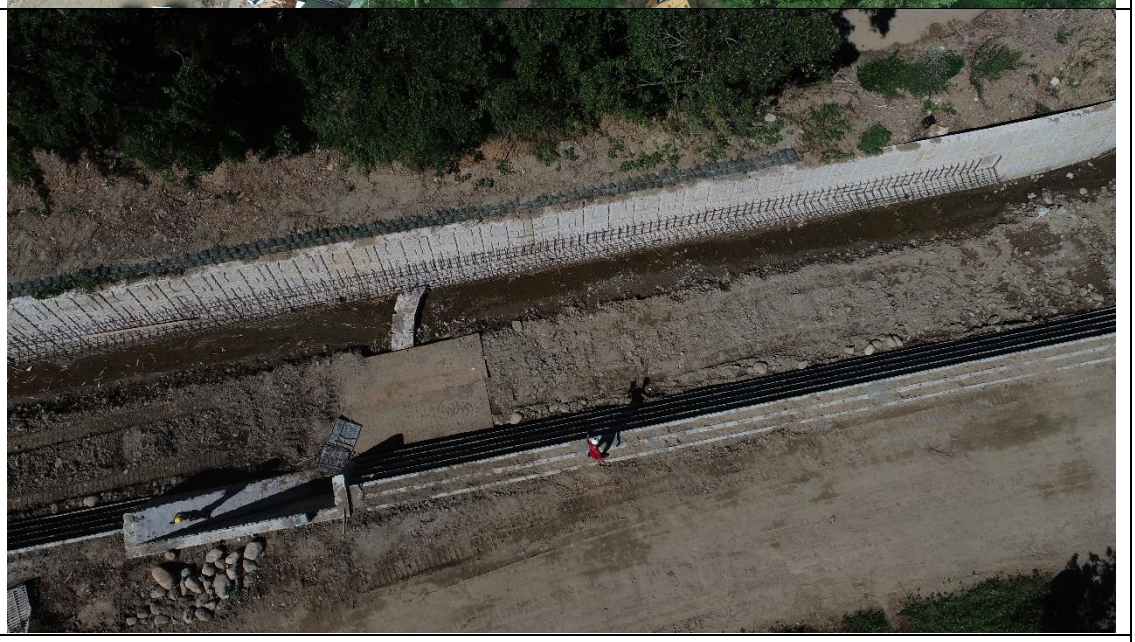
旱坑里 9 鄰野溪治理工程	
日期/ 進度(%)	成果影像
112/10/03 27.15%	
112/10/19 56.04%	
112/10/31 90.6%	
IPhone 掃描成果	
日期/	成果影像

進度(%)	
112/10/03 27.15%	
112/10/19 56.04%	
112/10/31 90.6%	
IPad 掃描成果	
日期/ 進度(%)	成果影像

112/10/03 27.15%	
112/10/19 56.04%	
空拍機 掃描成果	

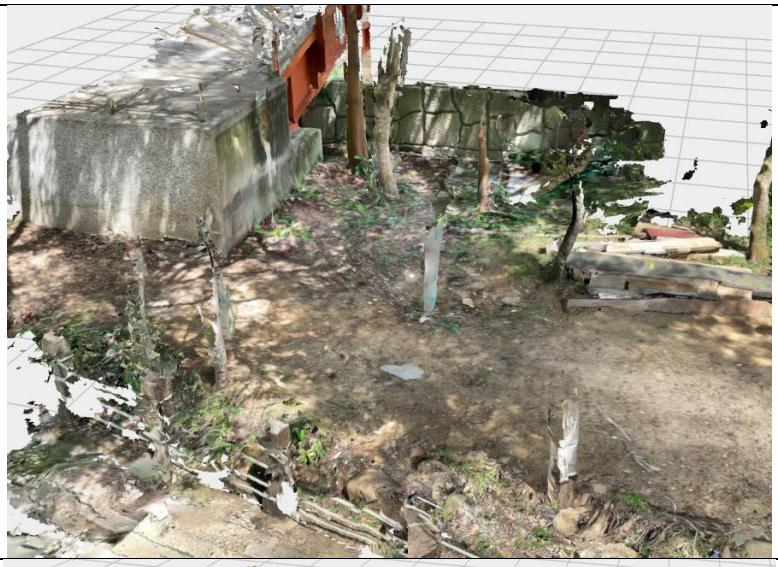
寶石里 6 鄰石頭坑野溪治理工程	
日期/ 進度(%)	成果影像
112/10/03 27.15%	
112/10/19 56.04%	
112/10/31 90.6%	
IPhone 掃描成果	
日期/ 進度(%)	成果影像
112/10/03 27.15%	

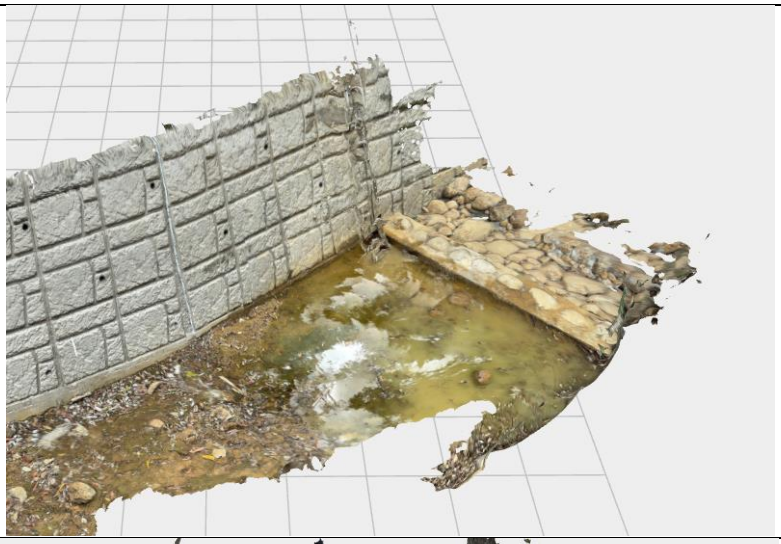
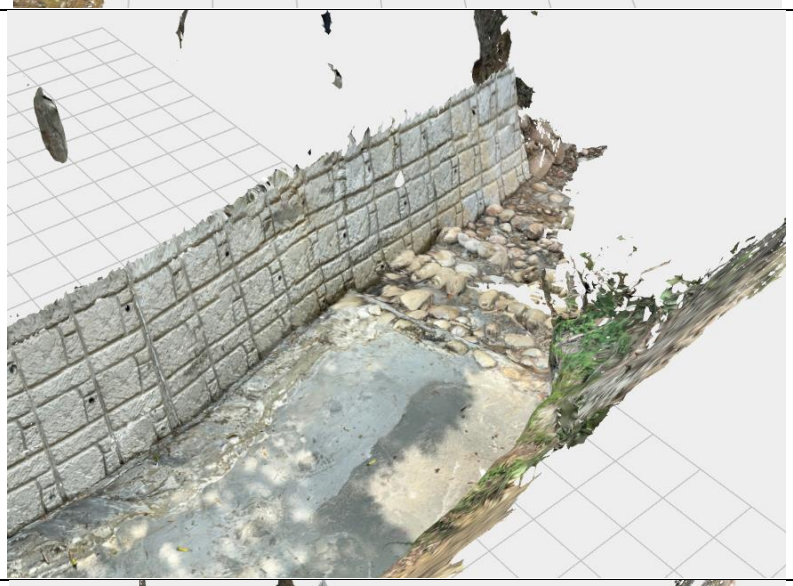
112/10/19 56.04%	
112/10/31 90.6%	
IPad 掃描成果	
日期/ 進度(%)	成果影像
112/10/03 27.15%	

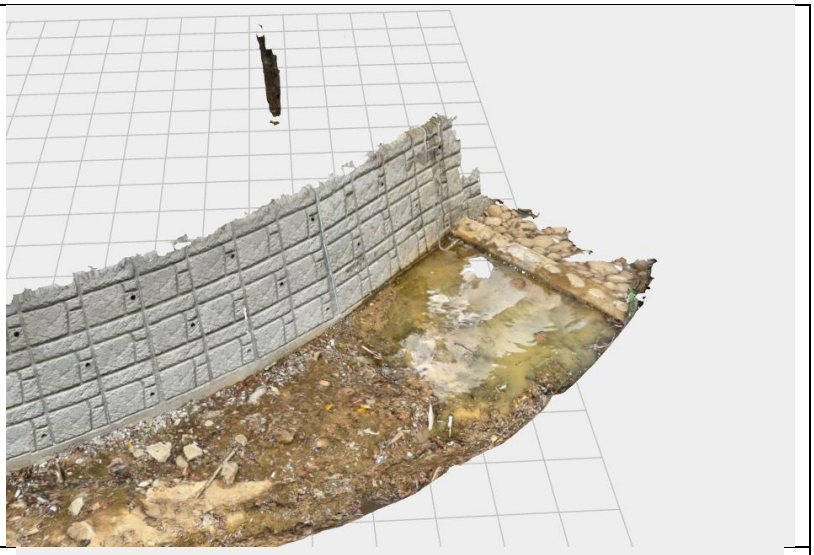
112/10/19 56.04%	
112/10/31 90.6%	
空拍機 掃描成果	

附件五、工區各進度溝造物掃描成果

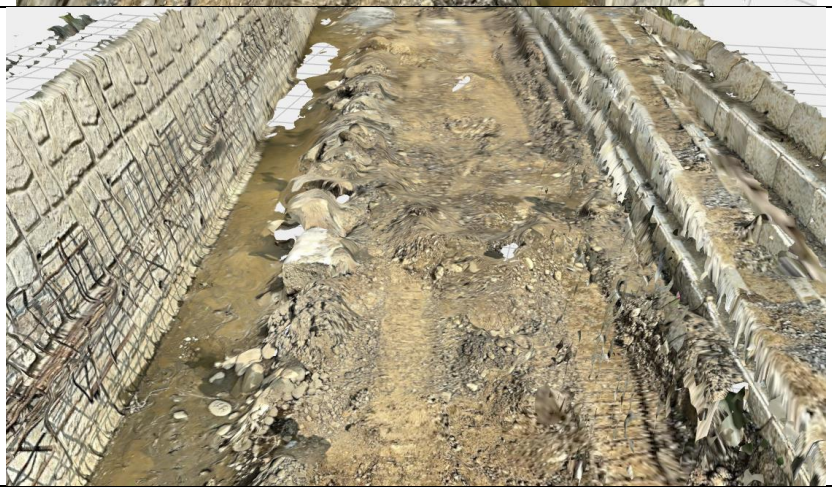
三義鄉雙潭社區香菇亭周邊環境改善工程	
時間/設施	樓梯
112/08/23	
112/10/03	
112/10/31	
IPhone 掃描成果	

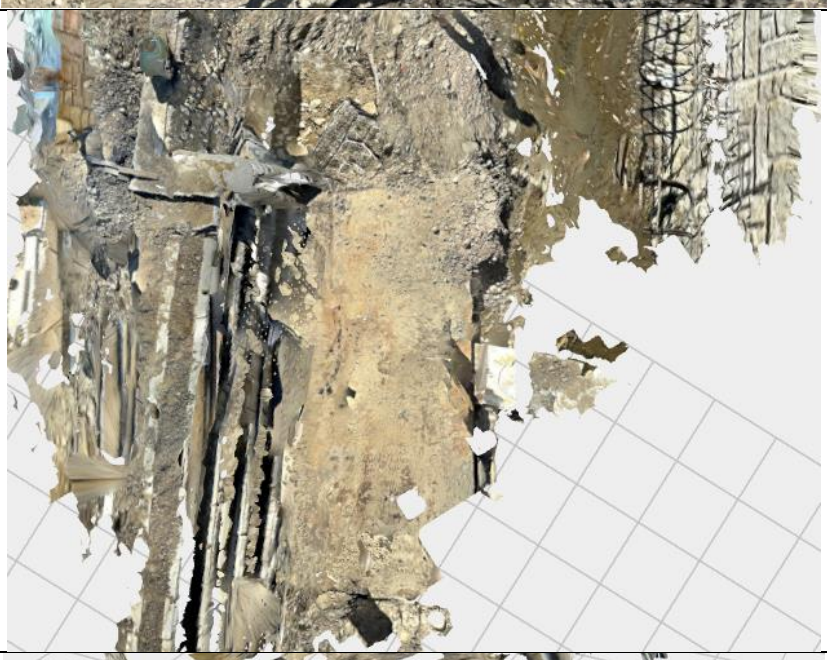
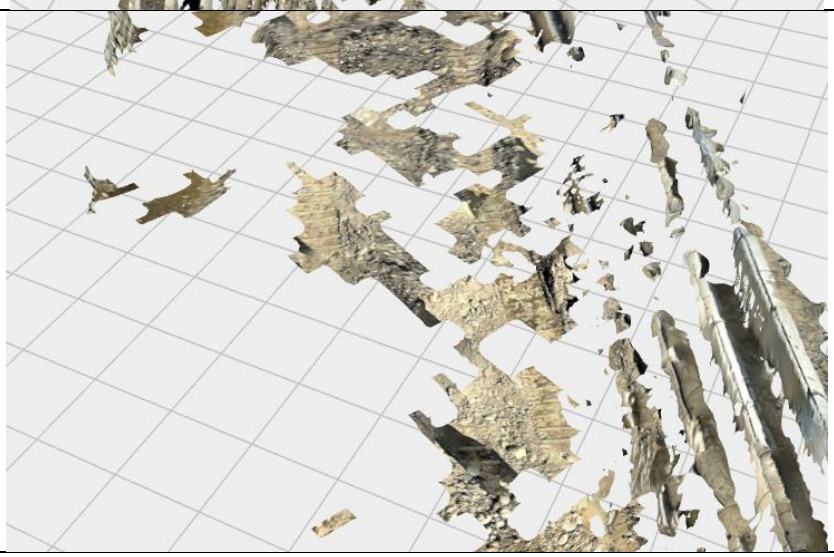
112/08/23	
112/10/03	
112/10/31	
IPad 掃描成果	
旱坑里 9 鄰野溪治理工程	

時間/設施	護岸、固床工
112/10/03	
112/10/19	
112/10/31	
IPhone 掃描成果	

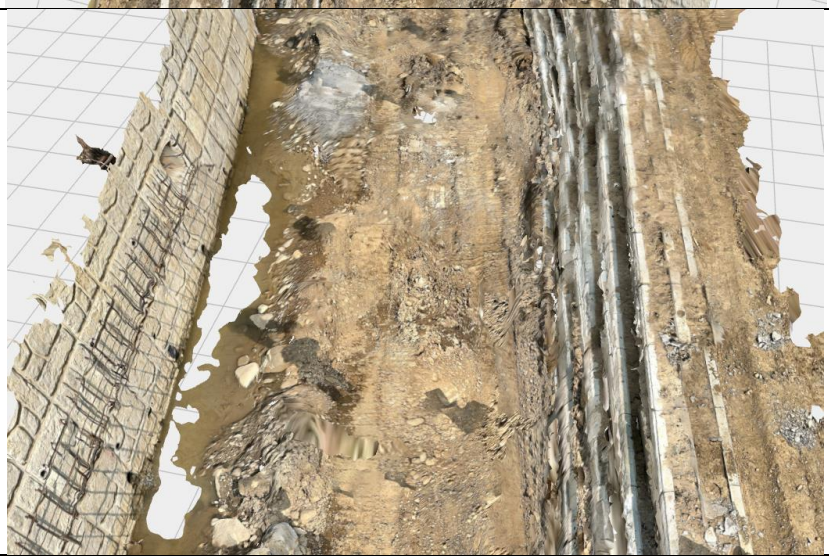
112/10/03	
112/10/19	
112/10/31	
IPad 掃描成果	

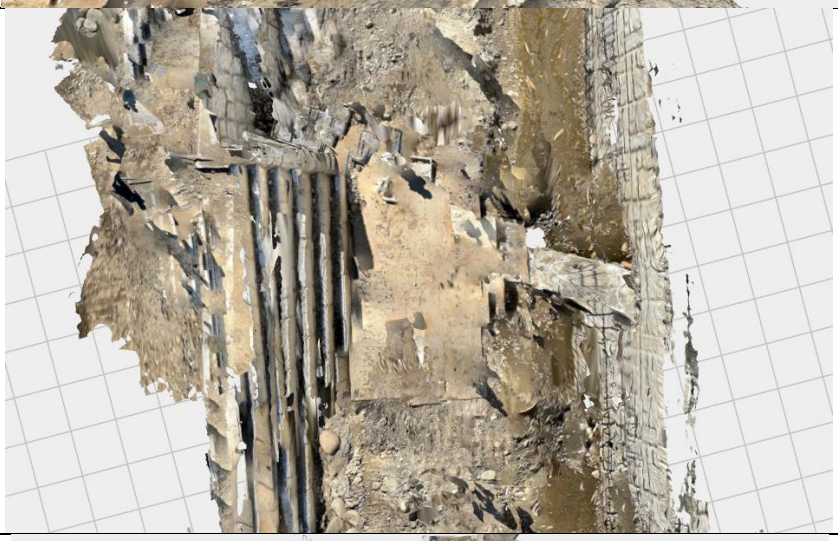
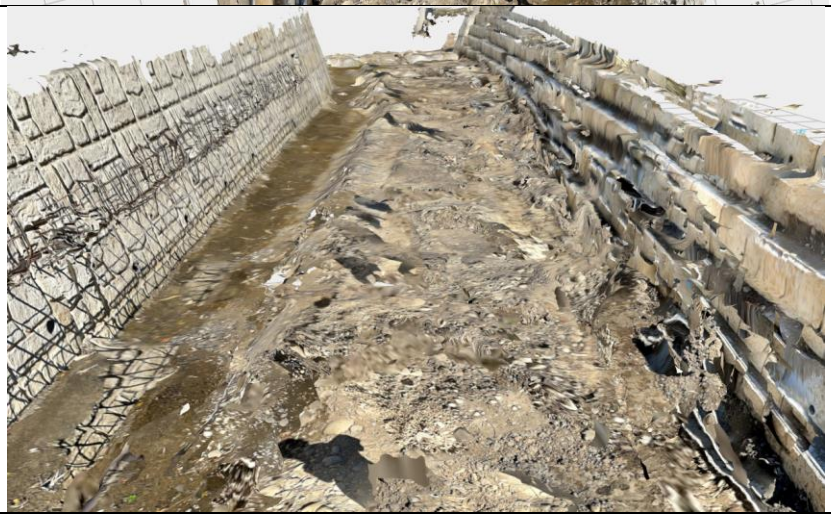
寶石里6鄰石頭坑野溪治理工程	
時間/設施	掃描成果
112/10/03 生物通道	
112/10/03 固床工	
112/10/03 護岸	

112/10/19 生物通道	
112/10/19 固床工	
112/10/19 護岸	

112/10/31 生物通道	
112/10/31 固床工	
112/10/31 護岸	
IPhone 掃描成果	

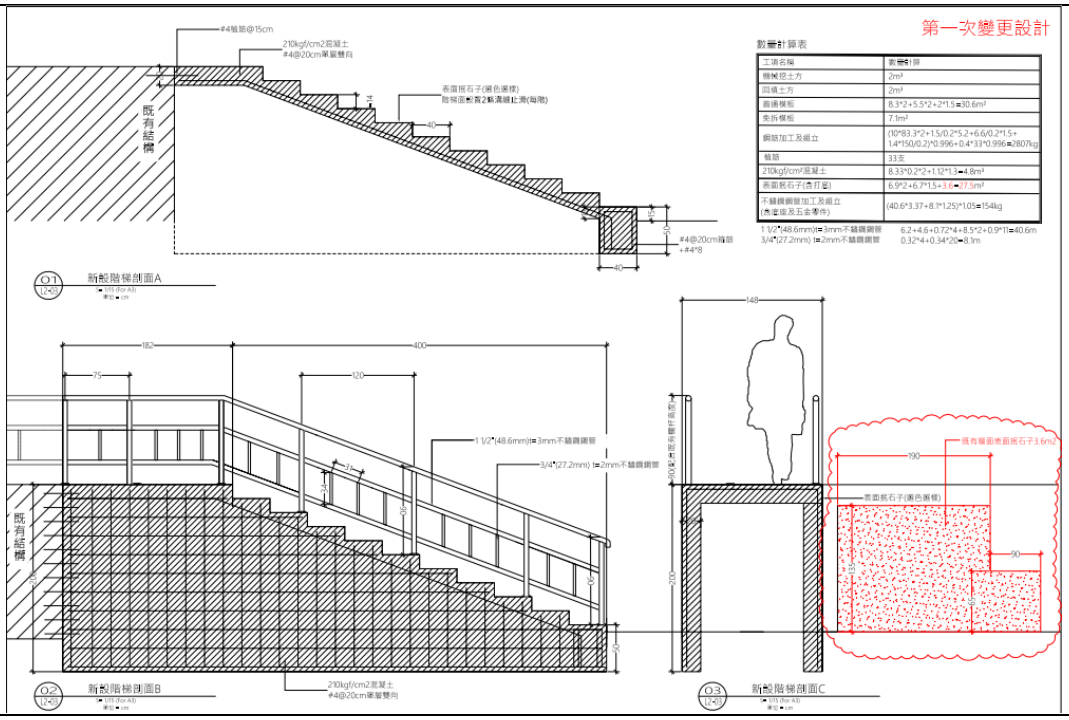
112/10/03 生物通道	
112/10/03 固床工	
112/10/03 護岸	

112/10/19 生物通道	
112/10/19 固床工	
112/10/19 護岸	

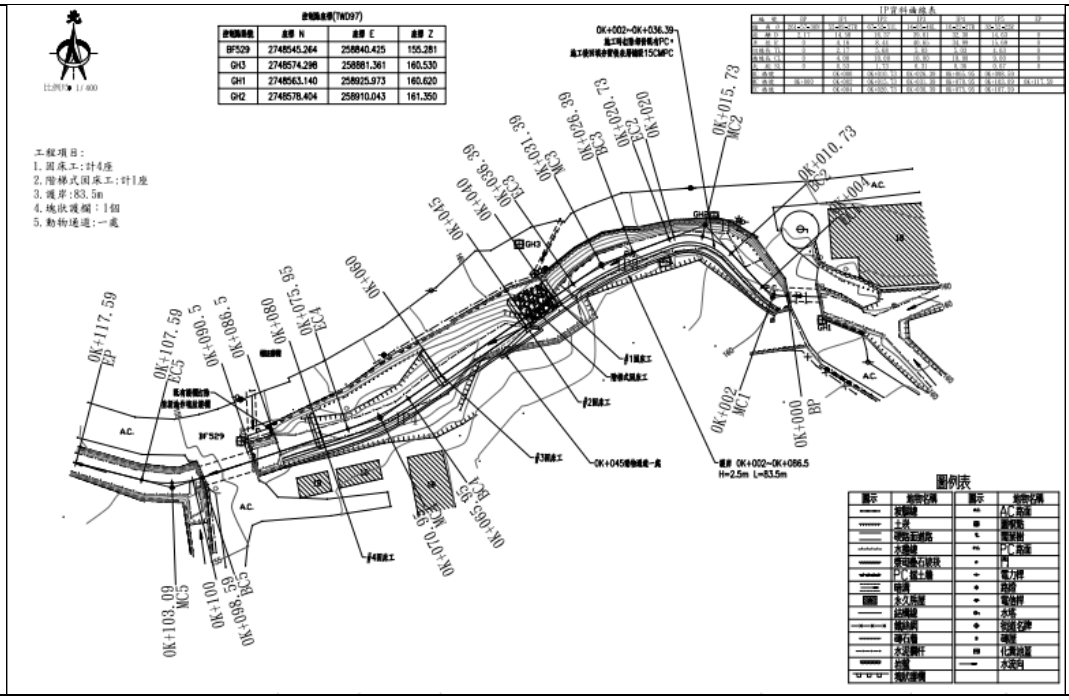
112/10/31 生物通道	
112/10/31 固床工	
112/10/31 護岸	
IPad 掃描成果	

附件六、構造物尺寸量測成果

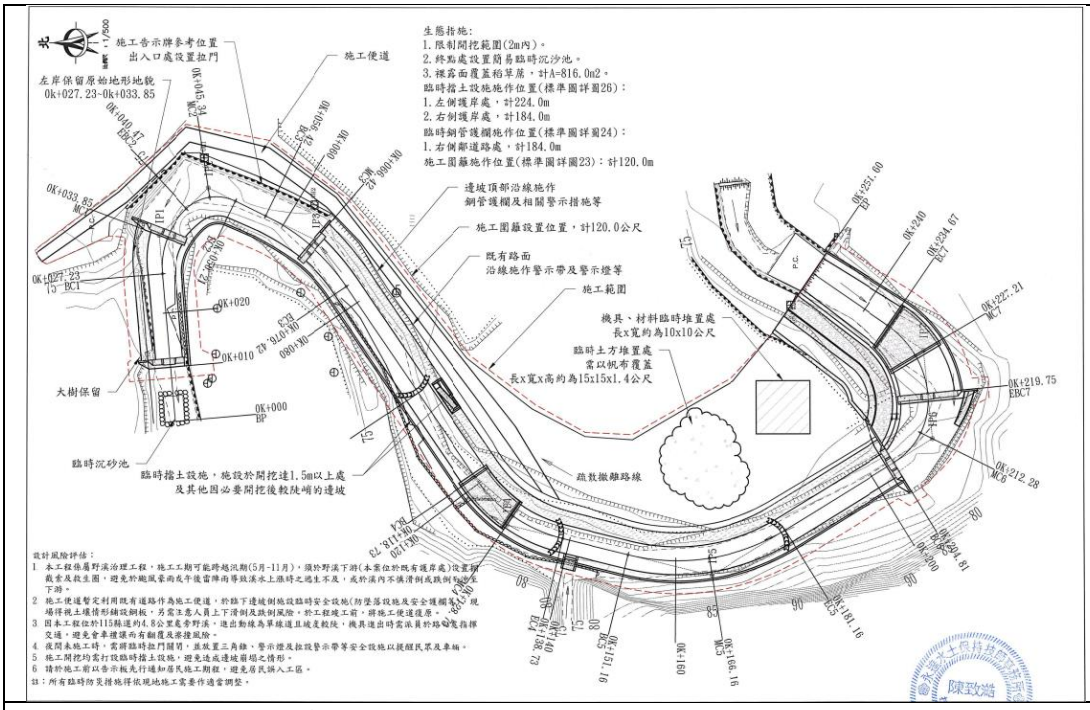
施工圖



三義鄉雙潭社區香菇亭周邊環境改善工程



旱坑里 9 鄰野溪治理工程



寶石里 6 鄰石頭坑野溪治理工程

<table>
<tr><td colspan="2">工程名稱</td></tr>
<tr><td colspan="2">三義鄉雙潭社區香菇亭周邊環境改善工程</td></tr>
<tr><td>目標物</td><td>階高</td></tr>
<tr><td>拍攝時間</td><td>112 年 10 月 03 日</td></tr>
<tr><td colspan="2">量測數值</td></tr>
<tr><td>設計圖說</td><td>15 cm</td></tr>
<tr><td>尺規量測</td><td>16 cm</td></tr>
<tr><td>I phone</td><td>5.51 cm</td></tr>
<tr><td>I Pad</td><td>9.17 cm</td></tr>
<tr><td colspan="2">
</td></tr>
<tr><td colspan="2">
</td></tr>
<tr><td colspan="2">I phone 掃描成果</td></tr>
<tr><td colspan="2">I Pad 掃描成果</td></tr>
<tr><td>目標物</td><td>階深</td></tr>
<tr><td>拍攝時間</td><td>112 年 10 月 03 日</td></tr>
<tr><td colspan="2">量測數值</td></tr>
<tr><td>設計圖說</td><td>40 cm</td></tr>
<tr><td>尺規量測</td><td>40.5 cm</td></tr>
<tr><td>I phone</td><td>37.9cm</td></tr>
<tr><td>I Pad</td><td>33.8cm</td></tr>
<tr><td colspan="2">
</td></tr>
<tr><td colspan="2">
</td></tr>
<tr><td colspan="2">I phone 掃描成果</td></tr>
<tr><td colspan="2">I Pad 掃描成果</td></tr>
<tr><td>目標物</td><td>階高</td></tr>
</table>

拍攝時間	112 年 10 月 31 日
量測數值	
設計圖說	15 cm
尺規量測	15 cm
I phone	13.82 cm
I Pad	11.47 cm





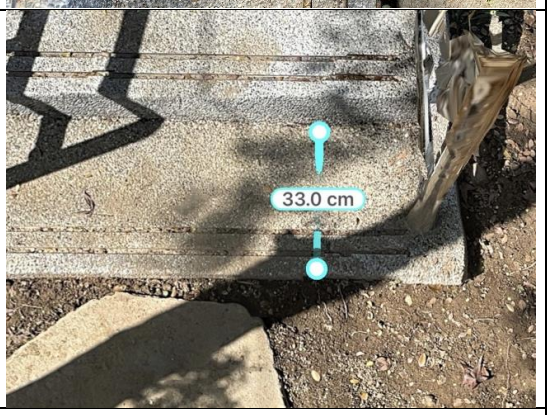


I phone 掃描成果 | I Pad 掃描成果

目標物	階深
拍攝時間	112 年 10 月 31 日
量測數值	
設計圖說	40 cm
尺規量測	37 cm
I phone	37.6 cm
I Pad	33 cm







I phone 掃描成果 | I Pad 掃描成果

<table>
<tr><td colspan="2">工程名稱</td></tr>
<tr><td colspan="2">寶石里 6 鄰石頭坑野溪治理工程</td></tr>
<tr><td>目標物</td><td>預鑄塊護岸(階深)</td></tr>
<tr><td>拍攝時間</td><td>112 年 10 月 31 日</td></tr>
<tr><td colspan="2">量測數值</td></tr>
<tr><td>設計圖說</td><td>- cm</td></tr>
<tr><td>尺規量測</td><td>25 cm</td></tr>
<tr><td>I phone</td><td>24.38 cm</td></tr>
<tr><td>I Pad</td><td>24.51 cm</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">
</td></tr>
<tr><td colspan="2">
</td></tr>
<tr><td colspan="2">I phone 掃描成果</td></tr>
<tr><td colspan="2">I Pad 掃描成果</td></tr>
<tr><td>目標物</td><td>預鑄塊護岸(階高)</td></tr>
<tr><td>拍攝時間</td><td>112 年 10 月 31 日</td></tr>
<tr><td colspan="2">量測數值</td></tr>
<tr><td>設計圖說</td><td>- cm</td></tr>
<tr><td>尺規量測</td><td>45 cm</td></tr>
<tr><td>I phone</td><td>39.4 cm</td></tr>
<tr><td>I Pad</td><td>38.6 cm</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">
</td></tr>
<tr><td colspan="2">
</td></tr>
<tr><td colspan="2">I phone 掃描成果</td></tr>
<tr><td colspan="2">I Pad 掃描成果</td></tr>
<tr><td>目標物</td><td>預鑄塊固床工寬</td></tr>
</table>

拍攝時間	112 年 10 月 31 日
量測數值	
設計圖說	80 cm
尺規量測	80 cm
I phone	62 cm
I Pad	77 cm

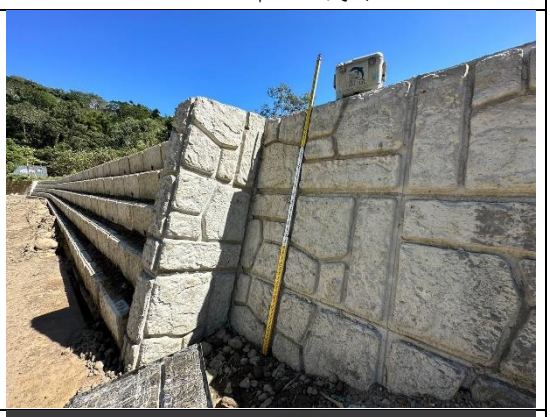


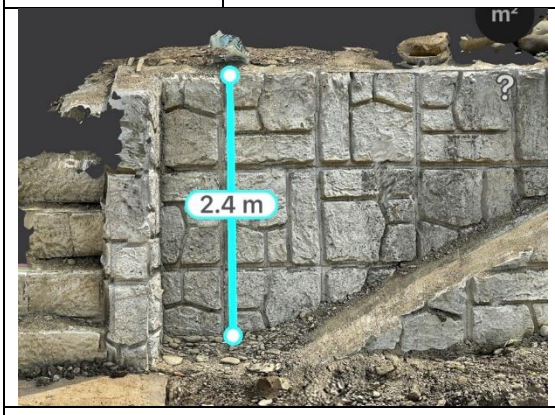


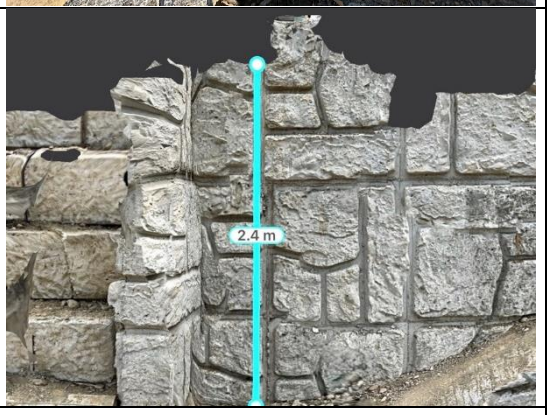


I phone 掃描成果 | I Pad 掃描成果

目標物	護岸高
拍攝時間	112 年 10 月 31 日
量測數值	
設計圖說	- cm
尺規量測	245 cm
I phone	240 cm
I Pad	240 cm







I phone 掃描成果 | I Pad 掃描成果

目標物	生物通道寬
拍攝時間	112 年 10 月 31 日
量測數值	
設計圖說	100 cm
尺規量測	100 cm
I phone	84 cm
I Pad	84 cm





I phone 掃描成果



I Pad 掃描成果

目標物	固床工
拍攝時間	112 年 10 月 31 日
量測數值	
設計圖說	102 cm
尺規量測	104 cm
I phone	92 cm
I Pad	88 cm





I phone 掃描成果



I Pad 掃描成果