
多音束無人船農塘水深模型建置研究
Establishment of bathymetric model of
agricultural irrigation pond using
unmanned surface vehicle with multi-beam
echo sounder
(初稿)

執行單位：國立成功大學測量及空間資訊學系

執行期間：112 年 02 月 08 日至 112 年 12 月 31 日

計畫主持人：郭重言 教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 112 年 11 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)

多音束無人船農塘水深模型建置研究

摘要

傳統水深測量無法進行淺水區之全覆式測量，且需大量人力介入，本研究提出以無人船（Unmanned Surface Vehicle, USV）或小艇搭載多音束測深儀（Multi-Beam Echo Sounder, MBES）方式，實現對農塘水深的自動化量測。研究中使用 NORBIT iWBMS 多音束測深系統，其整合全球導航衛星定位（Global Navigation Satellite System, GNSS）、慣性測量元件（Inertial Measurement Unit, IMU）及多音束水深資料，可即時取得高精度之水下地形三維點雲資訊。團隊已完成小艇及無人船兩次農塘水深測量，兩次測量成果皆產出農塘水下數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM）及進行水深測量成果品質檢核分析，分析包含檢核線交叉檢核（Cross Check）及總傳播不確定度（Total Propagation Uncertainty, TPU）分析，最後水深成果皆滿足國際海道測量組織（International Hydrographic Organization, IHO）特等及一等規範需求。本研究亦產製農塘之蓄水能量表及水位與蓄水面積及蓄水體積曲線，以提供相關單位進行農塘管理與相關水利施政參考。

關鍵詞：無人船、多音束測深儀、農塘、水深測量、數值高程模型

Establishment of bathymetric model of agricultural irrigation pond using unmanned surface vehicle with multi-beam echo sounder

Abstract

Traditional methods of bathymetric measurements are often inadequate for comprehensive measurements in shallow water areas, requiring labor-intensive manual efforts. This research advocates the adoption of Unmanned Surface Vehicles (USVs) or small boats equipped with Multi-Beam Echo Sounder (MBES) technology to achieve automated depth measurements in agricultural ponds. The NORBIT iWBMS Multi-Beam Echo Sounder system, integrated with Global Navigation Satellite System (GNSS) and Inertial Measurement Unit (IMU) components, is employed to generate real-time, high-precision underwater topographic data in the form of three-dimensional point clouds. The research team has successfully conducted two separate measurement campaigns of water depths in agricultural ponds, and generated Digital Elevation Models (DEMs) and finished the subsequent quality assessment of depth measurement results. This assessment includes cross-check verification and analysis of Total Propagation Uncertainty (TPU) and the results comply with the stringent requirements of the International Hydrographic Organization (IHO) for first-order and special-order standards. Furthermore, this study produces a table of water storage capacity, water level, and corresponding curves of storage area

and volume for these agricultural ponds, serving as indispensable data for informed management of ponds and water resource policymaking.

Keywords: USV, MBES, Farming ponds, Bathymetric surveying, DEM

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	IV
表次.....	V
圖次.....	VII
第一章 緒論	1-1
第一節 研究背景	1-1
第二節 研究目的	1-2
第三節 預期成果及貢獻效益	1-3
第二章 工作項目及期程	2-1
第三章 無人船、小艇農塘水深測量	3-1
第一節 研究區域	3-1
第二節 船體及儀器介紹	3-3
第三節 水深測量作業流程	3-11
第四節 水深測量資料處理與分析	3-15
第四章 農塘水深成果	4-1
第一節 水深測量外業	4-1
第二節 農塘水深網格成果	4-4
第三節 水深成果加值應用	4-16
第五章 結論與建議	5-1
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-1
附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-5

表次

表 2-1 工作期程表	2-1
表 3-1 鎮鑫科技自主研發無人船船體資訊	3-4
表 3-2 NORBIT iWBMS 多音束測深儀技術參數	3-7
表 3-3 APPLANIX POS MV WAVEMASTER 定位定向系統 資訊	3-9
表 3-4 AML SMART SV 表面聲速計技術參數	3-10
表 3-5 NORBIT BASE•X ₂ 聲速剖面儀技術參數	3-11
表 3-6 海道測量最低標準表	3-14
表 4-1 GNSS 基站之坐標資訊	4-1
表 4-2 A、B 池施測當下水面之正高	4-4
表 4-3 小艇、無人船測得之 A、B 池水深範圍	4-7
表 4-4 小艇檢核測線點雲資料與全區網格資料之差值 統計-A 池	4-8
表 4-5 小艇檢核測線點雲資料與全區網格資料之差值 統計-B 池	4-8
表 4-6 無人船檢核測線點雲資料與全區網格資料之差 值統計-A 池	4-10
表 4-7 無人船檢核測線點雲資料與全區網格資料之差 值統計-B 池	4-10
表 4-8 小艇施測 A、B 池水深成果總傳播不確定度 (TPU) 分析	4-12
表 4-9 無人船施測 A、B 池水深成果總傳播不確定度 (TPU) 分析	4-12

表 4-10 小艇施測 A、B 池水深成果與竣工圖樁號差值	
分析	4-14
表 4-11 無人船施測 A、B 池水深成果與竣工圖樁號差	
值分析	4-15
表 4-12 A 池網格成果差值統計（以小艇成果為參考面）	
.....	4-15
表 4-13 B 池網格成果差值統計（以小艇成果為參考面）	
.....	4-15
表 4-14 小艇及小艇計算之 A 池測量當下水面之蓄水能	
量表	4-18
表 4-15 小艇及無人船計算之 B 池測量當下水面之蓄水	
能量表	4-19
表 4-16 不同網格計算方法之蓄水面積比較.....	4-20
表 5-1 多音束與單音束及人工量測比較.....	5-2

圖次

圖 3-1 慈恩滯洪農塘竣工平面圖	3-2
圖 3-2 慈恩滯洪農塘現地圖	3-2
圖 3-3 鎮鑫科技自主研發無人船－客家號	3-4
圖 3-4 電腦地面站操作介面	3-5
圖 3-5 自製小艇外觀和尺寸示意圖	3-5
圖 3-6 小艇各部件安裝位置示意圖	3-6
圖 3-7 NORBIT iWBMS 多音束測深系統	3-7
圖 3-8 NORBIT iWBMS 掃描角度示意圖	3-8
圖 3-9 APPLANIX POS MV WAVEMASTER 慣導系統	3-9
圖 3-10 水深測量作業流程圖	3-12
圖 3-11 水深資料處理流程圖	3-18
圖 4-1 自製小艇（左）及無人船（右）執行農塘水深測 量作業	4-2
圖 4-2 備援充氣小艇	4-2
圖 4-3 水深測量實際測線（上：小艇；下：無人船）	4-3
圖 4-4 小艇施測之 A 池 0.5 公尺水面水深網格成果	4-5
圖 4-5 小艇施測之 B 池 0.5 公尺水面水深網格成果	4-5
圖 4-6 無人船施測之 A 池 0.5 公尺水面水深網格成果	4-6
圖 4-7 無人船施測之 B 池 0.5 公尺水面水深網格成果	4-6
圖 4-8 小艇施測 A 池檢核線分布位置（上）與差值分 布（下）	4-9
圖 4-9 小艇施測 B 池檢核線分布位置（上）與差值分 布（下）	4-9

圖 4-10 無人船施測 A 池檢核線分布位置（上）與差值	
分布（下）	4-11
圖 4-11 無人船施測 B 池檢核線分布位置（上）與差值	
分布（下）	4-11
圖 4-12 選取樁號於 A、B 兩池之分布（底圖：竣工圖）	
.....	4-13
圖 4-13 無人船 A 池水面水深網格三維展示	4-17
圖 4-14 無人船 B 池水面水深網格三維展示	4-17
圖 4-15 A 池 H-V, H-A 曲線圖	4-20
圖 4-16 B 池 H-V, H-A 曲線圖	4-20

第一章 緒論

第一節 研究背景

依水土保持技術規範第 55 條之規定，農塘之定義：在低窪地區或溪流適當地點，構築堤壩攔蓄逕流，以提供滯洪、農業等用水及改進生態環境並供休閒、遊憩之用（行政院農業委員會，2020）。蔡明發和陳金順於【蓄水於塘、滯洪於坡、保水於土、造福於民】文中指出以往農塘大多以提供山坡地農業灌溉用水為其主要功能，但隨時空演進，坡地農塘已調適為兼具灌溉、滯（蓄）洪、保水、沉砂、休閒遊憩等多元功能，且具有調適氣候變遷極端降雨之衝擊，是坡地水土保持興利防災的重要設施之一。吳約西（2003）指出農塘大多位於低窪排水不良之農田區域，具有蓄水、補充灌溉用水和地下水、減少水庫用水、淨化水源、減少地表逕流以達防洪功能、減緩地層下陷、調節下游泥沙量、調節微氣候、休憩、活化農村景觀、增進農民收益等功能，並具有滯洪池及沉砂池之功效。因為農塘水源以攔蓄地表逕流或引水進流為主，若上游土砂容易通過逕流流至農塘，造成農塘淤積，減少蓄水量和壽命，且因需大量人力和成本，難以進行農塘清淤（鴻昇工程科技有限公司，2019；國立中興大學，2019）。因此連續監測農塘各項水文參數有其必要性，其中進行農塘水深測量，求得水底地形模型，進而精確估計農塘蓄水量和淤積情形為重要的工作之一，其成果有助於管理單位規劃和設計農塘管理政策。

第二節 研究目的

傳統上利用聲納探測器浮球、單音束測深儀（Single-Beam Echo Sounder, SBES）或水尺斷面測量量測農塘水深，但上述方法僅能取得點的水深資料後，利用內外插來計算面的水底地形模型，容易因取樣不足或位置不具代表性而建置錯誤水深模型。此外，上述測量方式對外業測量人員具有相當危險性，尤其是水尺斷面測量。多音束測深儀（Multi-Beam Echo Sounder, MBES）是利用聲納發出多個扇面狀聲波後，計算各聲波至目標物後反射回來所需的時間，再利用時間計算聲波行走距離，進而獲得水深資訊，扇面狀聲波可涵蓋整個水深測量水域，可直接提供面狀的水深地形圖，與單音束測深儀比較，其作業效率較高，但資料處理和改正較為複雜，需要進行水深點雲資料疊合，需經驗豐富的外業和內業人員進行。常用傳統海測多音束測深儀體積較大、重量較重，一般架設於較大有人船舶，船舶吃水深度較深，因此無法進行淺水域的量測，例如農塘，因此需要有替代方案來測量水深。無人船或小艇重量輕吃水線淺之優勢，搭載小型多音束測深儀，搭載全球導航衛星系統（Global Navigation Satellite System, GNSS）接收儀和慣性測量元件（Inertial Measurement Unit, IMU），可進行農塘水域水深測量作業。

本研究將選定嘉義中埔鄉漚水溪慈恩滯洪農塘，採用搭載小型多音束測深儀之輕量型無人船和小艇進行水深測量作業，另進行農塘無人船和小艇多音束水深測量流程規劃研究，研提實施方法、進行資料計算與精度檢核，後將水深點雲資料產製成網格，並利用網格資料計算農塘蓄水池能量表。

第三節 預期成果及貢獻效益

本研究預期完成下列成果及貢獻效益：

- 1.完成多音束測深無人船和小艇農塘水深測量，突破傳統船載多音束水深測量無法進入淺水水域測量之限制，完成全覆蓋農塘水域水下地形模型建立。
- 2.完成農塘水底地形網格和蓄水池能量表計算，配合水保局經驗和規劃，針對農塘淤積提出建議，協助水保局對農塘之管理和規劃，進而對國家民生經濟做出貢獻。
- 3.本研究除了計畫主持人外，參與計畫人員以主持人之博士研究生與碩士研究生為主。主計畫需進行農塘無人船和小艇外業觀測，處理大量多音束測深儀點雲資料和計算水深模型，故研究生可以藉由外業和處理大量且多元資料，以獲取無人船測深資料處理之經驗。在理論方面，本計畫需瞭解 GNSS 定位原理、測深原理、資料處理流程、各項改正原理、大地測量等相關科學理論及相關程式設計能力，研究生也可在進行計畫過程中，學習處理分析不同來源資料與數據代表之物理意義，並可更進一步分析實驗農塘水域水文參數，因此本計畫富有教育和訓練研究人員之意義。
- 4.完成國內期刊一篇。

第二章 工作項目及期程

本案之工作項目及期程如表 2-1 所示，黑線為規劃之進度，紅線為實際執行進度，本案所進行之所有工作項目如下所示：

- 1.測深無人船和小艇測試（已完成）。
- 2.進行農塘水深測量作業（已完成）。
- 3.資料處理軟體安裝測試（已完成）。
- 4.水深資料處理與改正（已完成）。
- 5.建立水深地形模型和蓄水能量表（已完成）。
- 6.期中報告撰寫（已完成）。
- 7.期末報告撰寫（已完成）。

表 2-1 工作期程表

月次 工作項目	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	備註
1.完成多音束測深無人船（小艇）農塘水深測量，完成全覆蓋水域水下地形模型建立。												
測深無人船和 小艇測試												
進行農塘水深 測量												
農塘水深測量 資料不足處補 測												
2.完成農塘水底地形網格和蓄水池能量表計算。												

資料處理軟體												
安裝測試												
水深資料處理												
改正												
建立水深地形												
模型和蓄水能												
量表												
期中報告												
期末報告												
預定進度百分												
比%	9%	18%	27%	36%	45%	55%	64%	73%	82%	91%	100%	
(累積數)												

第三章 無人船、小艇農塘水深測量

船載水深測量為利用單音束或多音束測深儀量測水深，並藉由剖面深度測線進而產出水底地形，實際應用於內陸水域時（特別是水深小於 5 公尺的場域），因受限於船隻大小及吃水線深度，經常須另覓他法施測。近年來，無人載具科技已是國際發展的趨勢，其中以人工智慧結合移動載具的無人載具（車輛、航空器、船舶或其他結合之無人駕駛交通運輸工具）備受注目。國內於 107 年 11 月 30 日經立法院三讀通過《無人載具科技創新實驗條例》，推動我國與世界各國無人載具科技發展齊頭並進，顯示國內對於無人載具科技之重視。相較於傳統船載水深測量，無人船擁有重量輕吃水線淺之優勢，再搭載小型多音束測深儀、全球導航衛星系統接收儀和慣性測量元件，可進入一般船隻不易到達之區域進行施測，對於執行農塘水深地形測量提供了一種新型作業平臺。

第一節 研究區域

本案研究區域配合水保局需求選定嘉義中埔鄉漚水溪慈恩滯洪農塘，滯洪農塘分為 A、B 及 C 三池，其竣工平面圖如圖 3-1 所示，本團隊於 112 年 3 月 13 日現地勘查照片如圖 3-2 所示。由於今年降雨量較少，C 池尚未有水，故水深測量作業目前僅於 A、B 兩池施作。

多音束無人船農塘水深模型建置研究

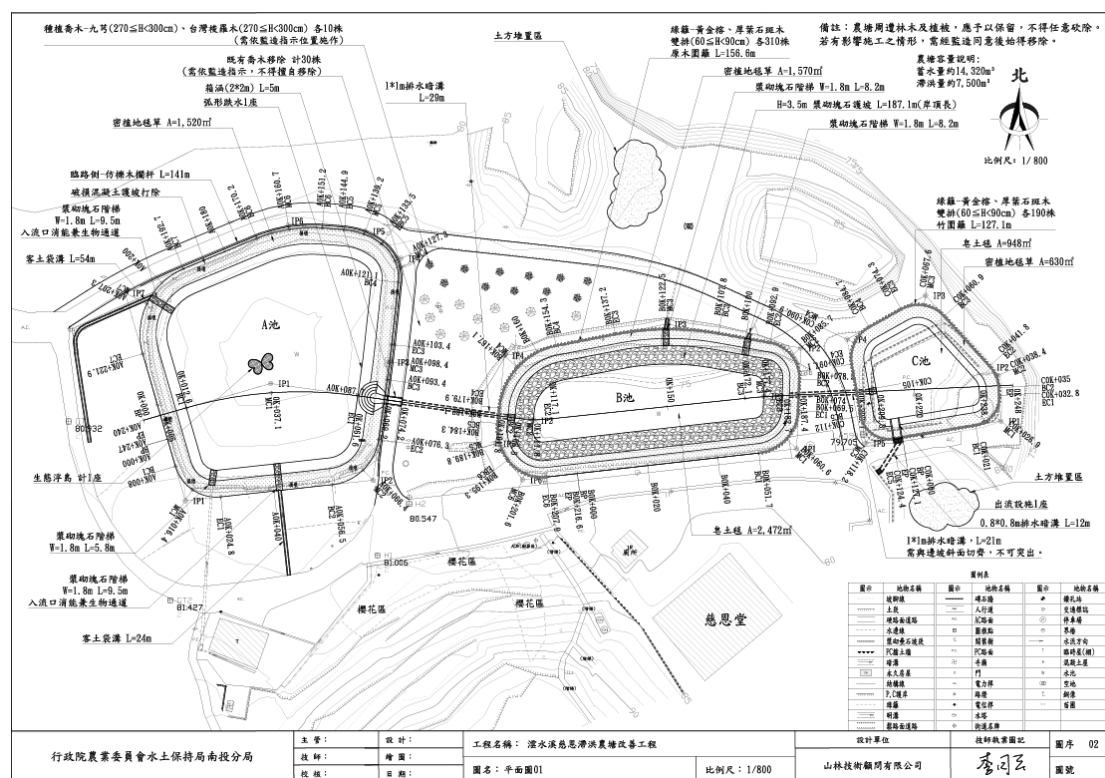


圖 3-1 慈恩滯洪農塘竣工平面圖

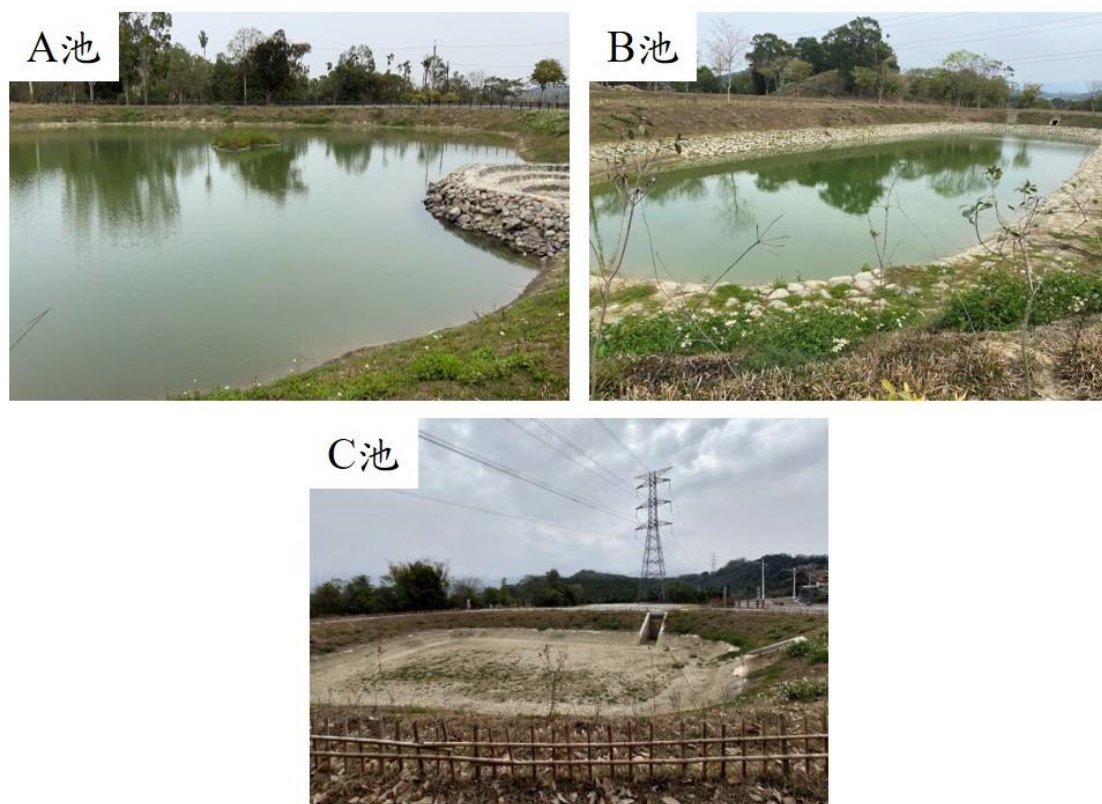


圖 3-2 慈恩滯洪農塘現地圖

第二節 船體及儀器介紹

本節將介紹本研究所使用的船體，包含無人船及小艇，以及水深測量作業所使用之多音束測深儀、定位定向系統（Position and Orientation System, POS）、表面聲速儀與聲速剖面儀等資訊。

一、無人船介紹

本研究所使用之無人船設備為鎮鑫科技自主研發之客家號，如圖 3-3 所示。船體採用模組化設計以提升運輸機動性，船身（主要浮力部件）使用 2 個魚池用浮筒組成雙船體，總浮力可達 115 公斤，船體結構則使用鋁擠型（4cm x 4cm），船體相關資訊如表 3-1 所示。

無人船執行水深測量作業可透過電腦地面站（自動化作業模式）與遙控器（手動作業模式）執行船隻遙控作業。自動化作業模式可透過航線規劃設計執行自動化任務，需輸入 GNSS 等地點資料，可使船隻自動抵達指定地點進行水深測量作業，其操作介面如圖 3-4 所示，此操作軟體係為開源程式再開發而成，只需輸入 GNSS 等地點資料，可使船隻自動抵達指定地點進行採樣或監測任務。介面顯示資料如下：

A.現測數據資料：可即時顯示當前船速、GNSS 接收狀態、船隻航向及水深資訊等資料，可依不同需求規劃。

B.地圖：使用 google 免費圖資。

C.影像：如有裝設錄影機，也可整合至畫面中監看。

由於農塘內有障礙物（如繩子或漂浮垃圾），故實際作業同時採取自動化作業模式（空曠且無障礙物區域）與手動作業模式（狹窄或有障礙物區域）以利船隻航行安全。



圖 3-3 鎮鑫科技自主研發無人船—客家號

表 3-1 鎮鑫科技自主研發無人船船體資訊

船體尺寸	1.60 × 1.30 × 0.36 公尺
船體重量（含設備）	85 公斤
最大載重	30 公斤
船體結構	魚池用浮筒+鋁擠型
最高船速	2 節
一般測量作業時船速	1 節
電池續航力	最長 5 小時（視使用狀況）



圖 3-4 電腦地面站操作介面

二、自製小艇介紹

本研究使用之自製小艇外觀和其尺寸如圖 3-5 所示。圖 3-6 所示為小艇各感測器安裝位置示意圖。當無人船馬力不足、故障或農塘內障礙物過多無法施測時，會以小艇進行後續農塘水深測量。

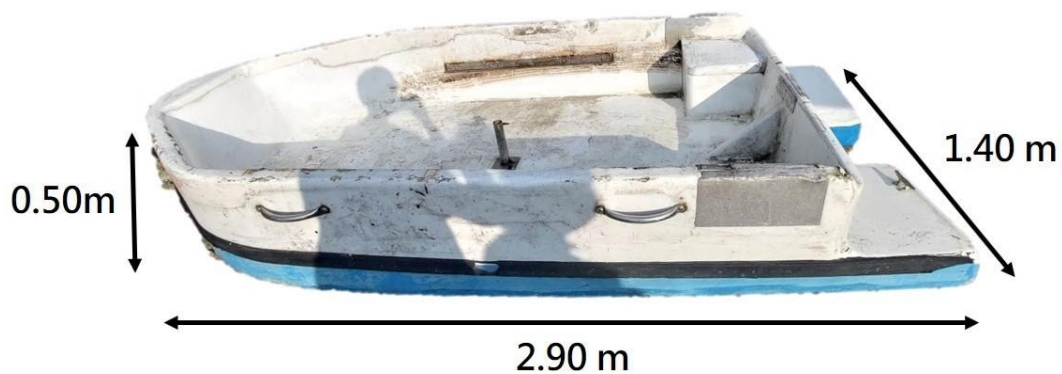


圖 3-5 自製小艇外觀和尺寸示意圖

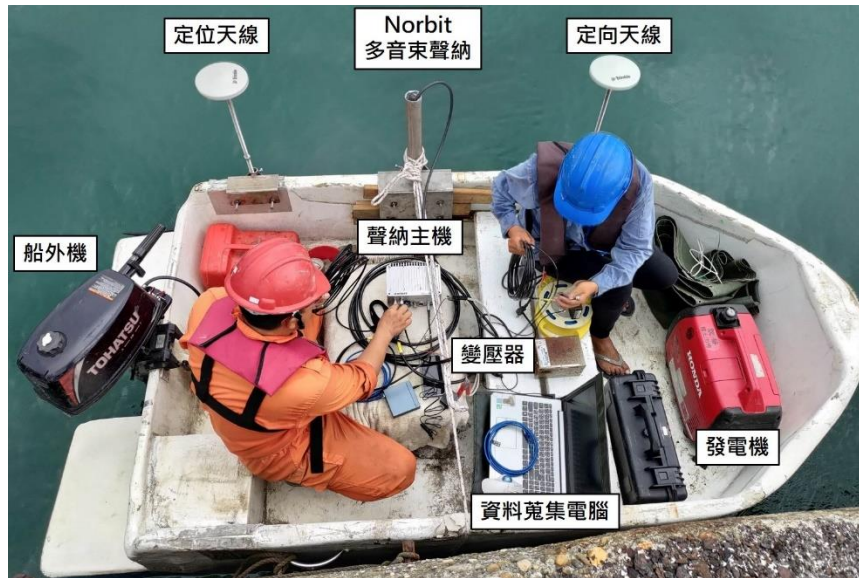


圖 3-6 小艇各部件安裝位置示意圖

三、NORBIT iWBMS 多音束測深儀

NORBIT 公司總部位於挪威，為歐洲航空電子及聲納製造領導企業，業務可分為電子製造服務（EMS）、智慧交通系統（ITS）和海底地形測繪（SubSea）。

NORBIT iWBMS 多音束測深系統整合多音束測深儀、Applanix GNSS/INS System 定位定向系統（如圖 3-7 所示）和表面聲速儀等，NORBIT iWBMS 並採用最新類比和數位訊號處理技術，是一款高度整合且具備高解析度的多音束測深系統，相關技術參數如表 3-2 所列。整套多音束測深系統重量僅 9.5Kg，攜帶方便，輕便小巧的外形設計也滿足無人船或小艇等輕量型的水上載具；此外，NORBIT iWBMS 音束最大開角可達 210 度（如圖 3-8 所示），能進一步提高作業效率。

基於上述的高度整合性、輕量化、安裝方便、操作簡單及功耗低的優點，本團隊選擇使用 NORBIT iWBMS 多音束測深系統於本案的農塘水深測量作業。

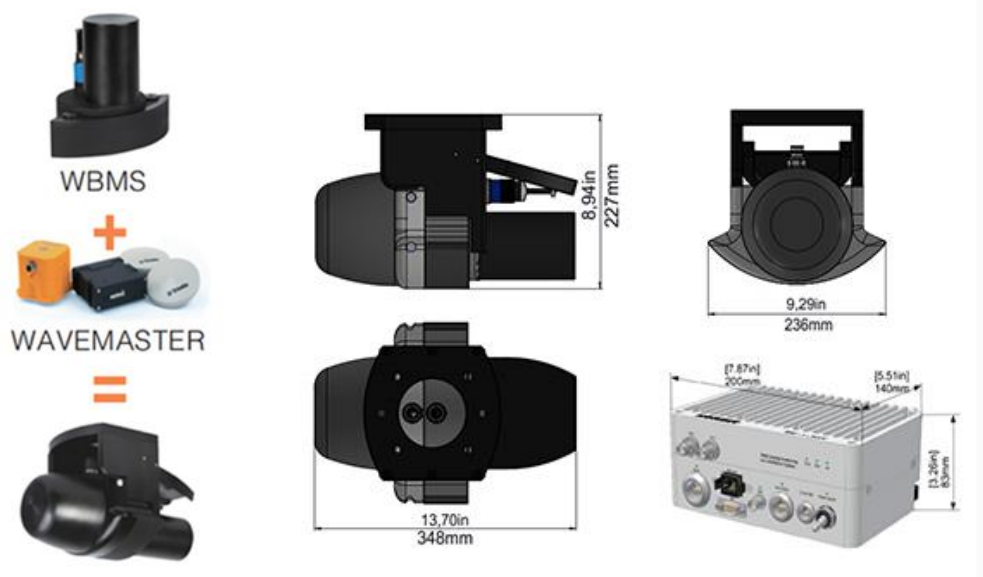


圖 3-7 NORBIT iWBMS 多音束測深系統[來源: NORBIT 網頁]

表 3-2 NORBIT iWBMS 多音束測深儀技術參數[來源: NORBIT 網頁]

航向精度	0.03°@2 米基線 0.02°@4 米基線
縱橫精度	0.02°
湧浪精度	2cm 或 2%
定位精度	水平：± (8mm+1ppm)； 垂直：± (15mm+1ppm)
工作頻率	中心頻率 400Khz，支援 200Khz-700Khz
條帶寬度	7°-210° (SHALLOW WATER IHO SPECIAL ORDER >155°)
解析度	<10mm
波束數	256-512 等角&等距
測量範圍	0.2m-275m (>300m WITH 0.9°X 0.9°OPTION)

波束開角	0.5°×1.0° Narrow 窄波束版：0.5°×0.5°
頻率	最高達 60Hz
工作/存儲溫度	-4°C至+40°C（最高-20°C至+55°C）/ -20°C至+60°C
防塵防水	IP67 等級

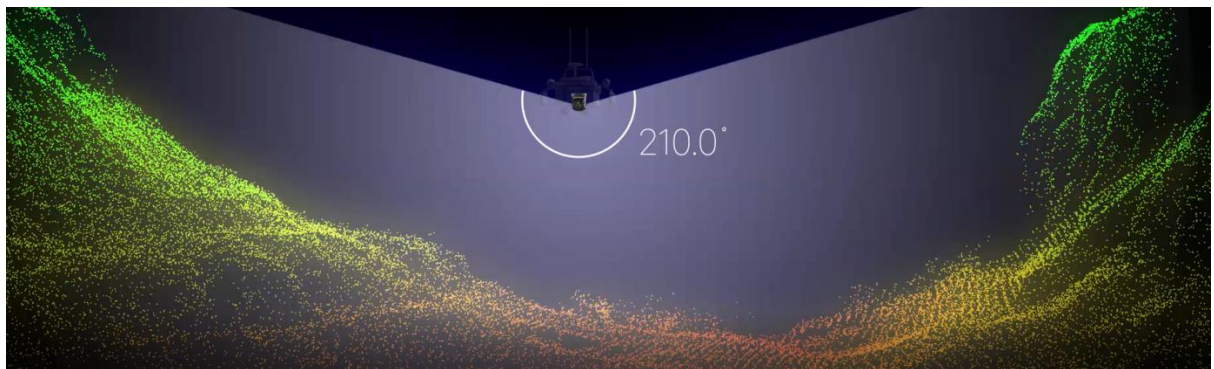


圖 3-8 NORBIT iWBMS 掃描角度示意圖[來源: NORBIT 網頁]

四、Applanix POS MV WaveMaster 系統

NORBIT iWBMS 配置加拿大 Applanix 所研發的 POS MV WaveMaster 系統，整合高精度的陀螺儀與 GNSS 定位資料，資料輸出頻率最高可達 200 Hz，無論無人船在動態還是靜態下都能夠提供高精度的定位、方向資訊和船隻姿態的解決方案，如圖 3-9 所示。

在 GNSS 訊號被遮蔽或由於多路徑效應而導致無法有效接收衛星訊號的區域，經由陀螺儀的協助下，POS MV WaveMaster 都能夠輸出可靠的位置和方向資訊。POS MV WaveMaster 系統具有很高的資料更新速率，該系統專為多音束測深系統使用所設計，即使波束覆

蓋寬度超過 ± 75 度（即開角 150 度）的情況下，該系統同樣能夠符合國際海道測量組織（International Hydrographic Organization, IHO）之相關規範。Applanix POS MV WaveMaster 定位定向系統技術資訊如表 3-3 所列。



圖 3-9 Applanix POS MV WaveMaster 慣導系統[來源: NORBIT 網頁]

表 3-3 Applanix POS MV WaveMaster 定位定向系統資訊

[來源: NORBIT 網頁]

POS MV WaveMaster	DGPS	RTK	GPS Outage
位置	0.5-2 m	0.02-0.1 m	<3m 30s 之內，<10m 60s 之內
橫向/縱向	0.03o	0.02 o	0.04o
航向精度	0.03°@ 2 米基線	-	每小時漂移小於 2 度
升沉	5cm 或 5%	5cm 或 5%	5cm 或 5%

五、AML Smart SV 表面聲速儀

NORBIT 全系標配 AML Smart SV 表面聲速儀整合至多音束測深系統內，其設計小巧、緊湊、高防水、易沖洗及測量聲速精確可靠等優點，相關技術參數詳見表 3-4，其功用為量測作業當下水面表面聲速數值，以作為後續聲速改正之參考。

表 3-4 AML Smart SV 表面聲速計技術參數[來源: NORBIT 網頁]

項目	參數
聲速範圍	1375~1625m/s
精密度	±0.006m/s
精度	±0.025m/s
解析度	0.001m/s
回應時間	47μS

六、NORBIT Base•X₂聲速剖面儀

執行水深測量作業時，除了測量表面聲速外，更須於作業執行當下投放聲速剖面儀以紀錄水體各層聲速變化（聲波於不同介質會有折射現象），用於後續水深資料處理進行聲速改正之用，但由於農塘水深較淺，聲速變化不大，但於作業中亦會投放聲速剖面儀蒐集數據以完善作業流程。本研究採用 NORBIT Base • X₂聲速剖面儀，其資料可自動下載並輸出成使用者所需格式（如文字檔、Excel 或特定海測軟體之檔案格式），簡化資料匯出與資料處理的操作過程，相關技術參數請參考表 3-5。

表 3-5 NORBIT Base • X₂聲速剖面儀技術參數[來源: NORBIT 網頁]

NORBIT Base • X ₂ 聲速剖面儀	
聲速測量範圍	1375-1625m/s
聲速測量解析度	0.001m/s
聲速測量精度	0.025m/s
回應時間	47μs
最大深度	100m
壓強測量量程	最大 100dbar
解析度	0.01dbar
精度	±0.05% FS
回應時間	10ms
尺寸	長 264mm×寬 69mm
重量	0.3kg(水中)
	1.0kg(空氣中)

第三節 水深測量作業流程

無人船於農塘之水深測量作業流程將根據「水深測量作業規範」(內政部, 2022a) 制定之工作流程為基準(如圖 3-10 所示), 並配合本案內容及無人船載體進行調整與評估, 例如本團隊之多音束測深儀與定位定向系統為一體化設計, 出廠時無安裝偏差, 軟體可直接計算 Roll、Pitch、Heading 與 Time 偏差, 即可免去 Patch Test 流程。

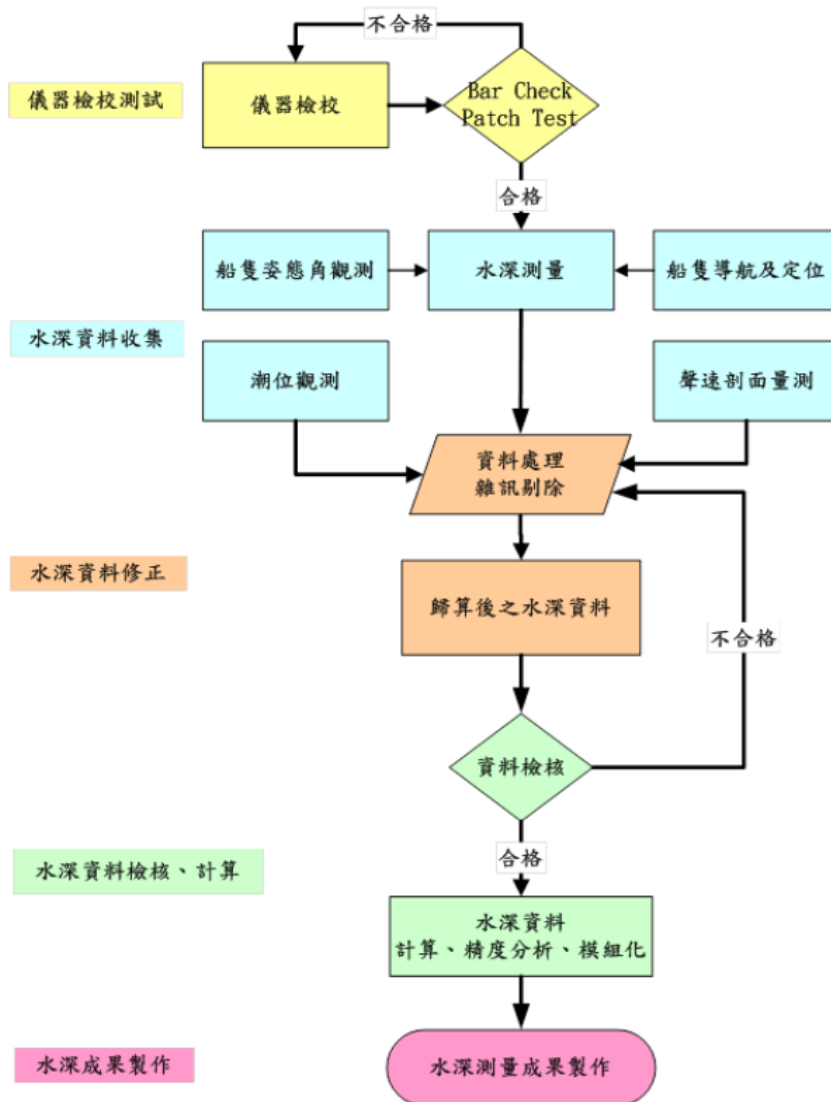


圖 3-10 水深測量作業流程圖（內政部，2022a）

一、控制測量作業規範

根據內政部「水深測量作業規範」（內政部，2022a），控制測量之大地基準為一九九七坐標系統（TWD97[2020]）；高程基準為二〇〇一高程系統（TWVD2001）。數值成果檔之大地基準則為 WGS84 坐標系統。農塘水深成果之高程基準可依據管理單位需求進行垂直基準轉換。

二、測線規劃

依照 IHO 海道測量最低標準可分為專等、特等、1 等 (1a 與 1b) 與 2 等，其各自規範如表 3-6 所示，等級依實地測量狀況或船隻航行需求選擇適當分級。根據內政部水深作業規範應採用多音束系統辦理全覆式海床掃測之等級如下：

A.專等或特等：船底淨空需求很重要的水域，例如泊區、港區、航道 (shipping channel) 中的極重要區域，惟部分港區水深過淺，為避免測線過密致實際作業困難，得免做全覆式掃測。

B.1a：船底淨空需求較低，但可能存在影響航安的特徵物水域。

多音束測深系統施測之測線規劃原則須滿足軌跡正下方每 3 公尺或 10% 深度的距離（取其較大者）內至少有 3 個音束 (beam) 的點(港區範圍內多音束點距須小於 0.5 公尺)。主測線覆蓋率需達 110% 以上（專等主測線覆蓋率須達 200%），且船隻回轉時所測得資料不得作為計算成果之資料，亦不納入前開有效資料覆蓋率計算，另需施測約略與測線垂直之檢核線，所有測線至少與檢核線交錯 1 次。

本案於農塘執行水深測量作業對於航線規劃沒有特別限制，只要能滿足全覆蓋之測量工作即可；另外作業過程中亦須施測檢核線以評估水深資料品質，但因農塘測線較不規則，所以不要求所有測線至少與檢核線交錯 1 次。

表 3-6 海道測量最低標準表（內政部，2022a）

等級	2 等	1b	1a	特等 (Special Order)	專等 (Exclusive Order)
適用水域描述	水深超過 200 公尺的水域	對於預期通過水域的船舶，船底淨空不是問題	船底淨空需求較低，但可能存在影響航安之特徵物之水域(備註2)	船底淨空需求很重要的水域（備註3）	船底淨空需求更嚴格的水域(備註4)
平面不確定度 (95% 信心區間)	20 公尺 + 10% × 水深	5 公尺 + 5% × 水深	5 公尺 + 5% × 水深	2 公尺	1 公尺
深度不確定度 備註 1 (95% 信心區間)	a = 1 公尺 b = 0.023	a = 0.5 公尺 b = 0.013	a = 0.5 公尺 b = 0.013	a = 0.25 公尺 b = 0.0075	a = 0.15 公尺 b = 0.0075
水下特徵物偵測	未標明	未標明	水深 40 公尺內，特徵物大於 2 公尺；超過 40 公尺，特徵物大於 10% 水深(備註5)	特徵物大於 1 公尺	特徵物大於 0.5 公尺
水下特徵物搜尋	非必要	非必要	100%	100%	200%
測深覆蓋率	5%	5%	≤100% (備註6)	100%	200%

備註 1：以 $[a^2 + (b \cdot d)^2]^{1/2}$ 公式計算

a：固定水深誤差 b：從屬水深誤差因子 d：水深（公尺）

備註 2：例如沿岸水域、港口、航道

備註 3：例如錨泊區、港區、主航道和航道(shipping channel)中的極重要區域

備註 4：前述特等適用水域中的淺水區，船底淨空極關鍵且海床底質對船舶有潛在危險。

備註 5：水深超過 40 公尺以上，要偵測的特徵物尺寸隨身度增加而增加。

備註 6：但必須取得所有顯著特徵物的最淺深度。

三、定位測量

定位測量預計採即時動態衛星定位（RTK）或動態後處理衛星定位（PPK）或同精度等級測量辦理。

四、水深測量

- 1.依規劃測線辦理水深測量，應全程配置姿態儀（或含湧浪補償器）。
- 2.需選擇作業區附近受風、浪、船隻進出影響較小之處設立臨時潮位站，先埋樁並引測已知水準點，潮位站樁位布設與精度應符合控制測量作業規定。由於農塘水位不受潮汐影響，故可省略此項作業。
- 3.每日水深測量作業區域中，於深水區作 1 次以上聲速剖面量測，並在測量作業時選擇水溫溫差較大時段再次量取聲速剖面，河口及電廠等溫度或鹽度變化較大之海域，應增加聲速剖面量測次數。本案農塘深度較淺且溫鹽度理論上變化不大，表面聲速度和水下聲速變化很小，但於施作過程中仍會投放聲速剖面儀以記錄水下聲速變化。

第四節 水深測量資料處理與分析

水深資料處理作業流程如圖 3-11 所示，資料處理流程會配合實際作業進行調整與評估。

- 1.單一測線初步濾除如訊號品質不佳水深值、異常水深值及定位品質不佳的水深點。多音束水深資料由於測點密集、資料量龐大，需藉

由專業處理軟體來作計算處理，本案團隊目前採用的是 CARIS HIPS and SIPS 11.3 版。

2.依據內政部「水深測量作業規範」，水深資料應加入各項修正資料，包含潮位資料、聲速剖面資料、儀器架偏移參數、船隻姿態資料及率定資料等，經檢核無誤後才加入水深資料之修正計算，可得到歸算後的水深資料。

A.潮位資料修正

因本案施測之農塘不受潮汐之影響，故無需考慮潮位資料修正。

B.聲速資料修正

本案施測的農塘水深淺且儲水為淡水，水下聲速不似海水受溫度和鹽度影響而產生較大的變化。利用表面聲速計同步蒐集水下表面聲速資料外，精確修正聲速的變化，以提高水深成果資料品質。

C.儀器架設偏移參數修正、疊合測試

以船隻重心為相對坐標之中心，船隻重心至船首方向為基準方向，在安置測深系統的各項裝置時記錄並繪製各裝置的相對位置以茲修正計算。

D.船隻姿態改正

多音束水深測量需配置姿態感測器(Motion Sensor)及電羅經(Gyro Compass)以即時記錄測深時船隻的俯仰角(Pitch)、搖擺角

(Roll)、航偏角(Heading)之角度及上下起伏(Heave)之高度，作為後續水深修正計算的輸入資料。

- 3.利用重疊之資料進行交錯比較其差值剔除不符水深點。
- 4.最後計算成果之精度是否符合水深測量之規範，製作統計計算報表，應包含檢核點數、差值資料(差值分布情形)及統計分析結果。

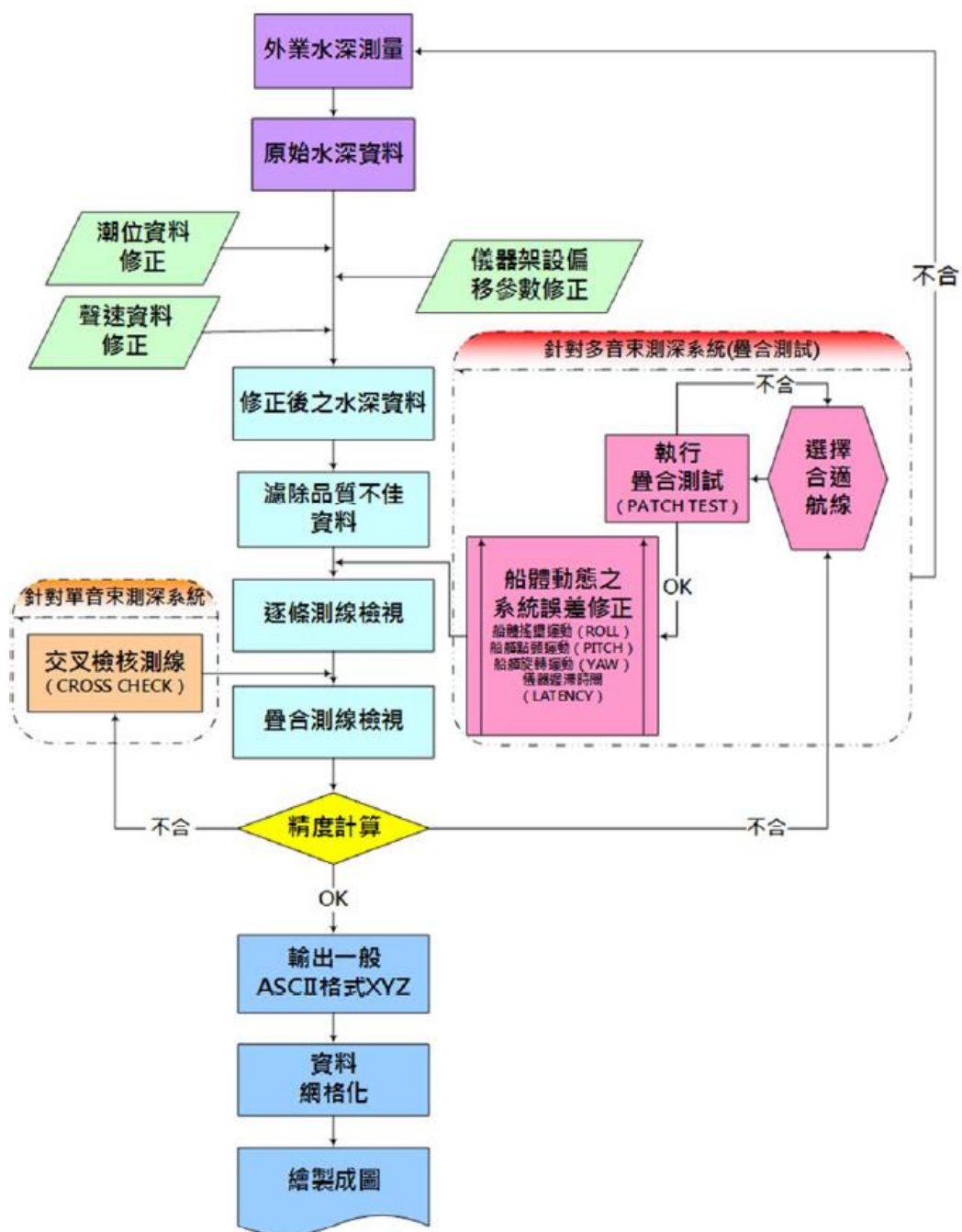


圖 3-11 水深資料處理流程圖（內政部，2022a）

第四章 農塘水深成果

第一節 水深測量外業

本團隊於 112 年 6 月 20 日使用小艇及 112 年 7 月 4 日使用無人船於澧水溪慈恩滯洪農塘 A、B 池進行水深測量作業。因附近無衛星追蹤站，故執行水深作業前須架設岸上 GNSS 基站（Base），以利後續內業執行 PPK 定位解算求得船隻精確坐標，故本團隊於 112 年 6 月 20 日以 e-GNSS 即時動態定位測量方式測量基站坐標，後續利用內政部國土測繪中心提供之轉換程式將 e-GNSS 坐標轉換為 TWD97 [2020]平面坐標及 TWVD2001 高程，坐標和正高資訊如表 4-1 所示。

自製小艇及無人船執行農塘水深作業之作業情形如圖 4-1 所示，兩者之作業流程相同，惟使用無人船作業時需準備救援設備（如圖 4-2 所示），可於無人船被水中障礙物勾住或突發狀況時使用。小艇與無人船執行水深測量作業之實際測線如圖 4-3 所示，因無人船較容易進行迴轉故可施測較密（測線間距較小）之測線，可獲得更高密度之三維水深資訊。

表 4-1GNSS 基站之坐標資訊

點號	TWD97 [2020]		TWVD2001	備註
	E (m)	N (m)	H (m)	
Base	198537.587	2590832.269	81.068	基站坐標



圖 4-1 自製小艇（左）及無人船（右）執行農塘水深測量作業



圖 4-2 備援充氣小艇

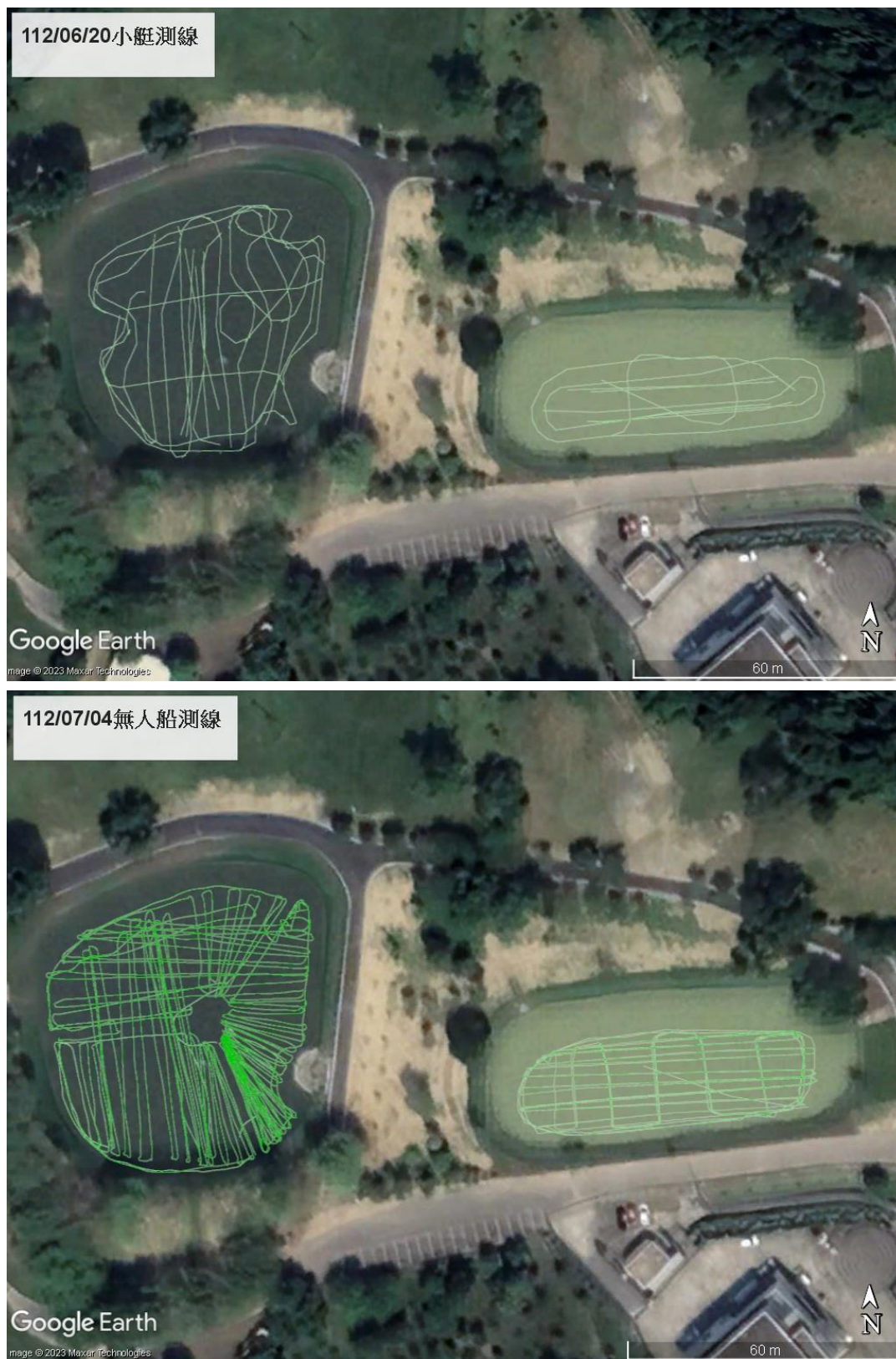


圖 4-3 水深測量實際測線（上：小艇；下：無人船）

第二節 農塘水深網格成果

本小節將分別呈現利用小艇（112/06/20 施測）及無人船（112/07/04 施測）之水深成果，水深起算基準以當下測量之水面為參考面（向下為正），並利用 e-GNSS 量測施測當時的水面正高（如表 4-2 所示）以供轉換至絕對高程。後續水深以水面為基準面稱為水面水深，以 TWVD2001 為基準稱為正高水深，兩者皆以向下為正。

表 4-2 A、B 池施測當下水面之正高

水面高度@正高	A 池	B 池
112/06/20 施測	78.947 m	76.468 m
112/07/04 施測	78.898 m	76.503 m

圖 4-4 至圖 4-7 為小艇及無人船 A、B 兩池之 0.5 公尺水面水深網格成果。由圖可知 A 池之水下地形由四周往中間開始變深；B 池之水下地形則由邊坡往下變深後就維持相似的水深值，且使用不同載具之兩次施測成果呈現一致趨勢。兩次所測得之水深範圍（水面水深及正高水深）如表 4.3 所示，由於測量當下水面高有些微差異（A 池 4.9 公分；B 池 4.1 公分），此差值亦反映於 A、B 兩池的最深水深值中。另一方面，從成果中亦可看出利用無人船可測得較淺之水深值，其原因為無人船吃水較小艇淺，加上無人船可行駛於滯洪池較邊緣地區並以側掃方式進行掃描，故可獲得較淺之水深點雲；而正高水深最深處，兩者結果相近，僅差距 0.1 公分和 0.3 公分。

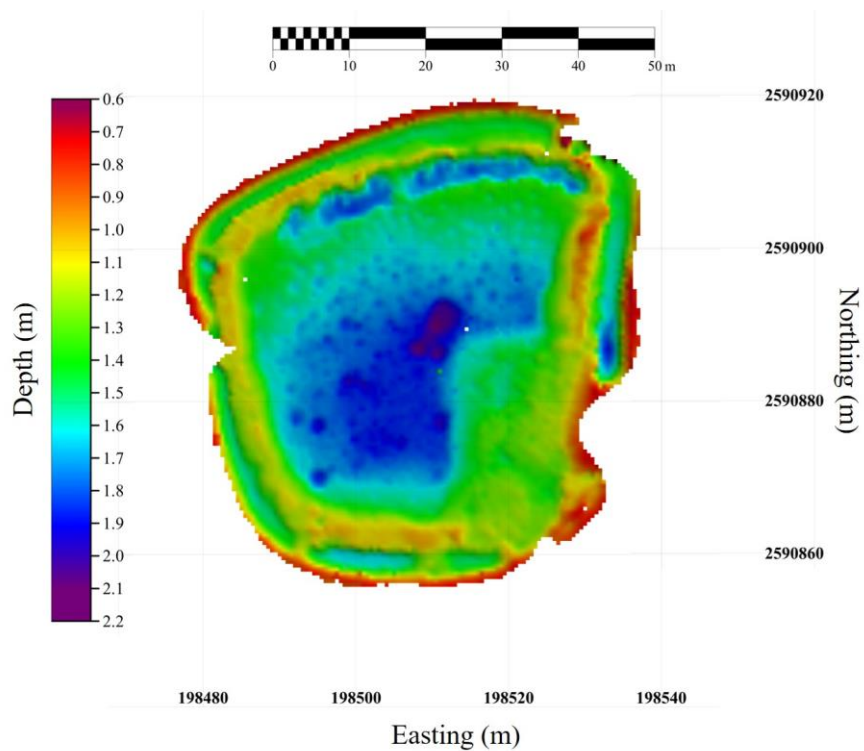


圖 4-4 小艇施測之 A 池 0.5 公尺水面水深網格成果

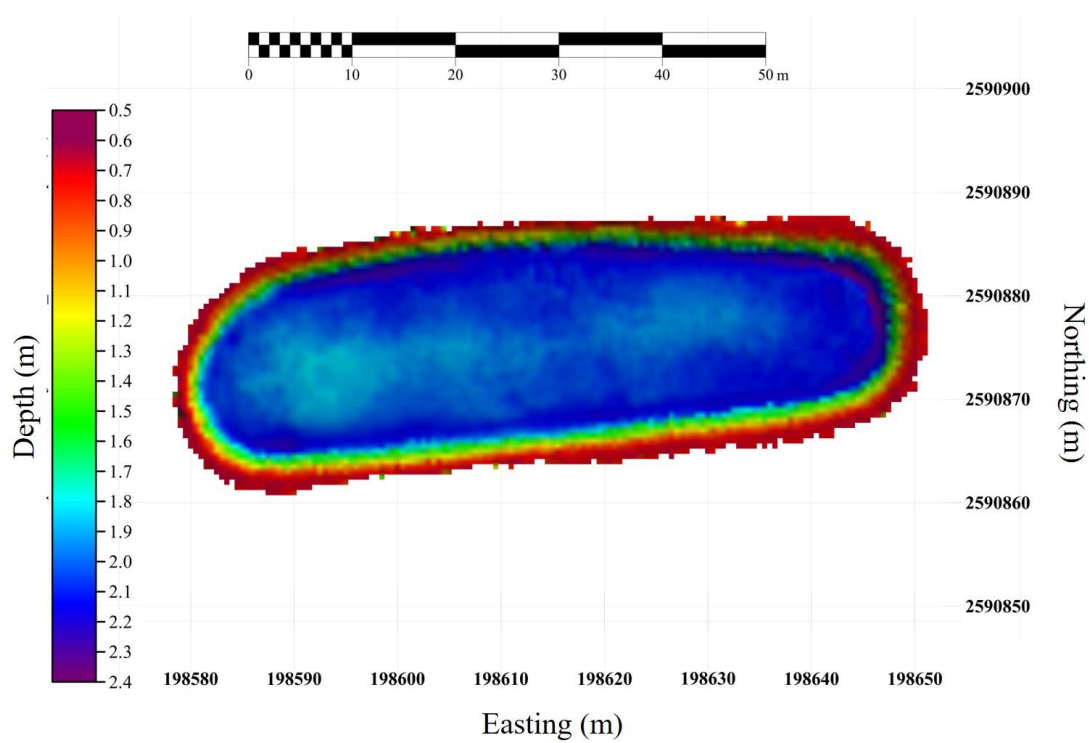


圖 4-5 小艇施測之 B 池 0.5 公尺水面水深網格成果

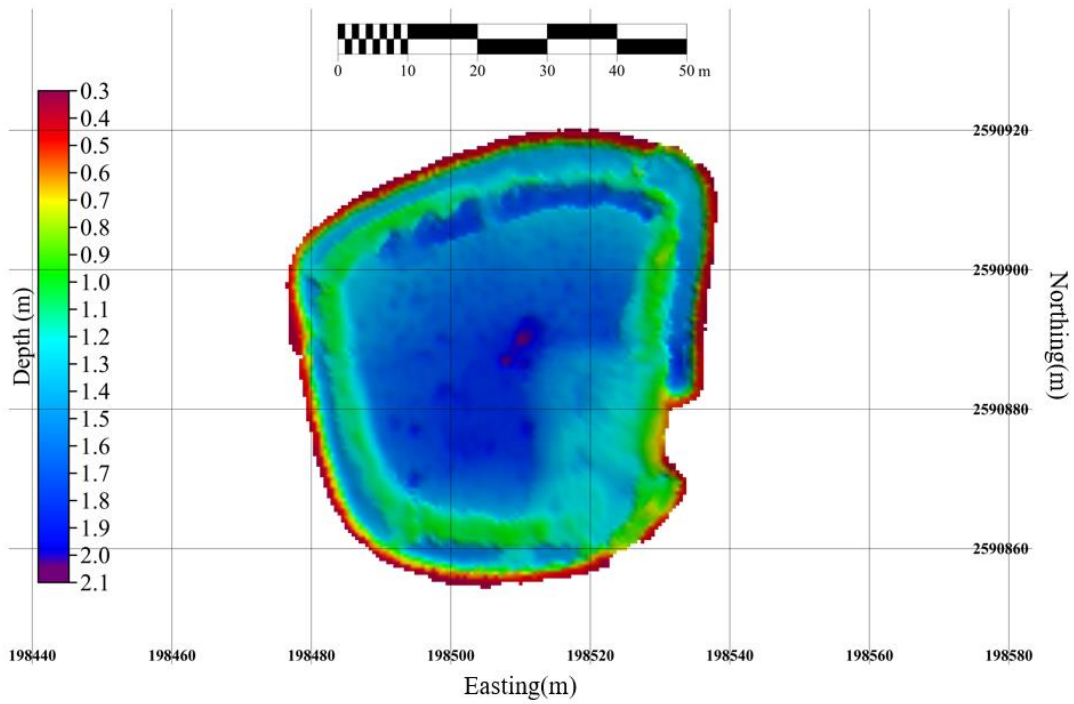


圖 4-6 無人船施測之 A 池 0.5 公尺水面水深網格成果

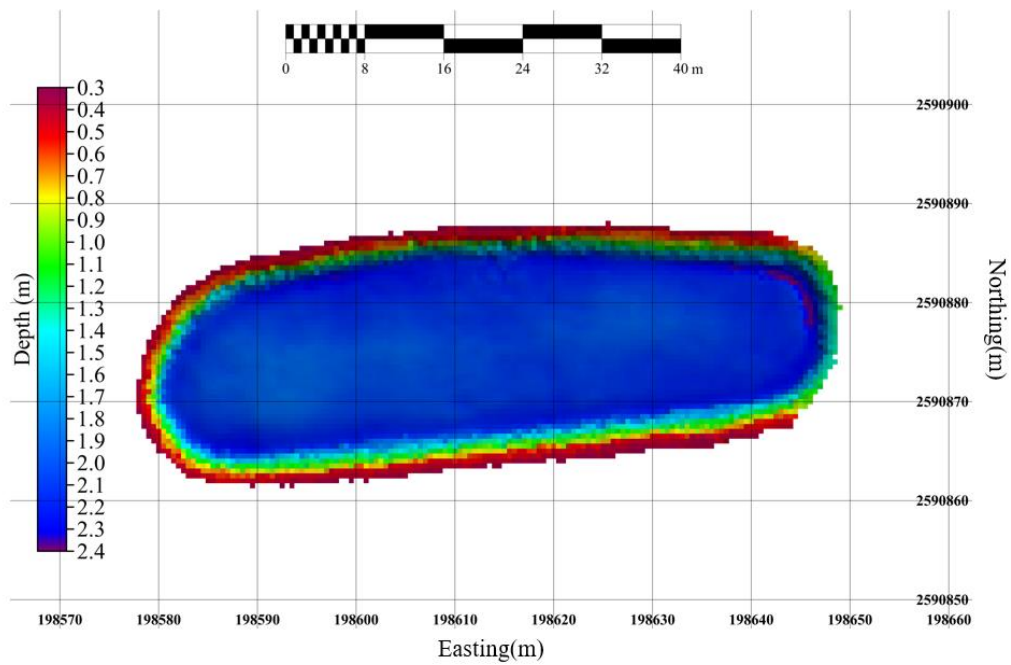


圖 4-7 無人船施測之 B 池 0.5 公尺水面水深網格成果

表 4-3 小艇、無人船測得之 A、B 池水深範圍

水深值範圍/施測方式	小艇	無人船
A 池@水面高	0.621-2.104 m	0.296-2.052 m
A 池@正高	78.326-76.843 m	78.602-76.846 m
B 池@水面高	0.599-2.378 m	0.315-2.414 m
B 池@正高	75.869-74.090 m	76.188-74.089 m

為了檢核水深資料品質，須透過檢核測線以交叉檢核的方式進行，因本案採用全覆式測量，故以 IHO 特等及一等規範進行檢核。檢核流程為先產製全區 0.5 公尺網格資料後與檢核測線之點雲資料進行差值比較，圖 4-8 為小艇 A、B 兩池的檢核線分布位置，表 4-4 及表 4-5 為小艇施測之 A 池與 B 池交叉檢核成果。從統計資訊看出 A 池與 B 池之水深成果皆符合 IHO 特等與一等之精度規範，A 池特等及一等合格率皆高於 99%、B 池特等合格率高於 98%，一等合格率接近 100%。差值分布圖如及圖 4-9 所示，差值標準偏差分別為 7.4 公分（A 池）與 7.8 公分（B 池），顯示兩池成果之一致性。

圖 4-10 為 A、B 兩池的檢核線分布位置，表 4-6 及表 4-7 為無人船施測之 A 池與 B 池交叉檢核成果。從統計資訊看出 A 池與 B 池之水深成果皆符合 IHO 特等與一等之精度規範，A 池特等及一等合格率皆高於 99%、B 池特等合格率高於 95%，一等合格率接近 100%；差值分布圖如圖 4-11 所示，差值標準偏差分別為 7.0 公分（A 池）與 9.1 公分（B 池）。

表 4-4 小艇檢核測線點雲資料與全區網格資料之差值統計-A 池

總載入點數	1,372,882		
差值之平均值(m)	-0.005		
差值之標準偏差(m)	0.074		
差值範圍(m)	[-1.31, 1.58]		
特等精度誤差極限(m)	0.250		
特等精度合格筆數	1,363,252	合格率	99.30 %
特等精度不合格筆數	9,630	不合格率	0.70 %
一等精度誤差極限(m)	0.500		
一等精度合格筆數	1,370,824	合格率	99.85 %
一等精度不合格筆數	2,058	不合格率	0.15 %

表 4-5 小艇檢核測線點雲資料與全區網格資料之差值統計-B 池

總載入點數	479,777		
差值之平均值(m)	-0.022		
差值之標準偏差(m)	0.078		
差值範圍(m)	[-1.27,0.79]		
特等精度誤差極限(m)	0.250		
特等精度合格筆數	472,727	合格率	98.53%
特等精度不合格筆數	7,050	不合格率	1.47%
一等精度誤差極限(m)	0.500		
一等精度合格筆數	479,598	合格率	99.96%
一等精度不合格筆數	179	不合格率	0.04%

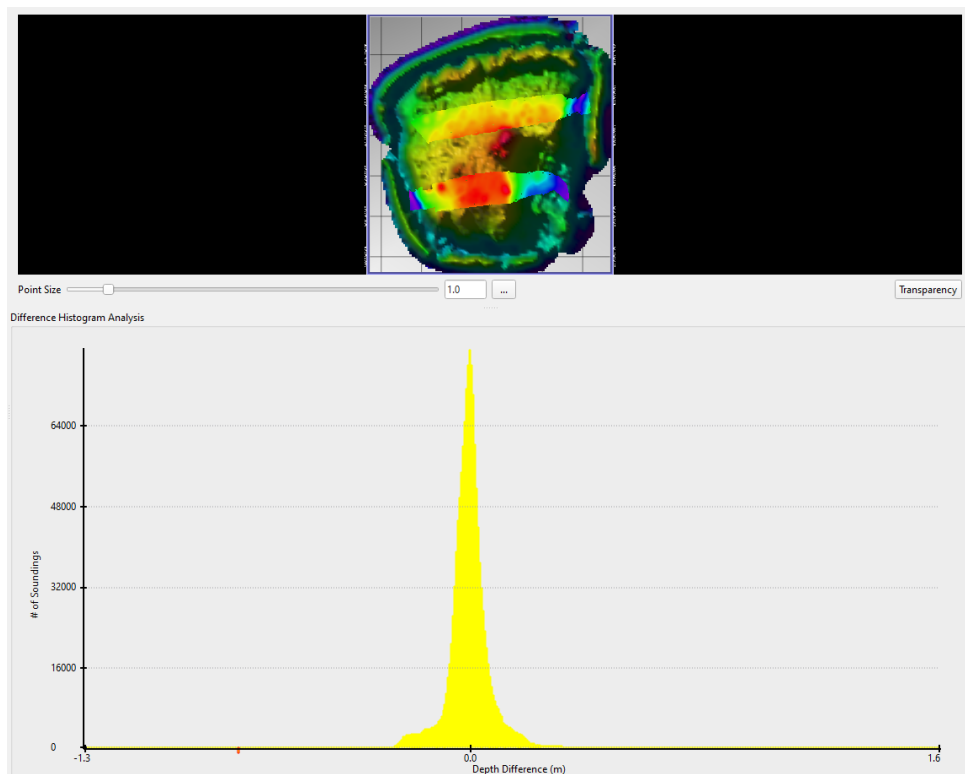


圖 4-8 小艇施測 A 池檢核線分布位置（上）與差值分布（下）

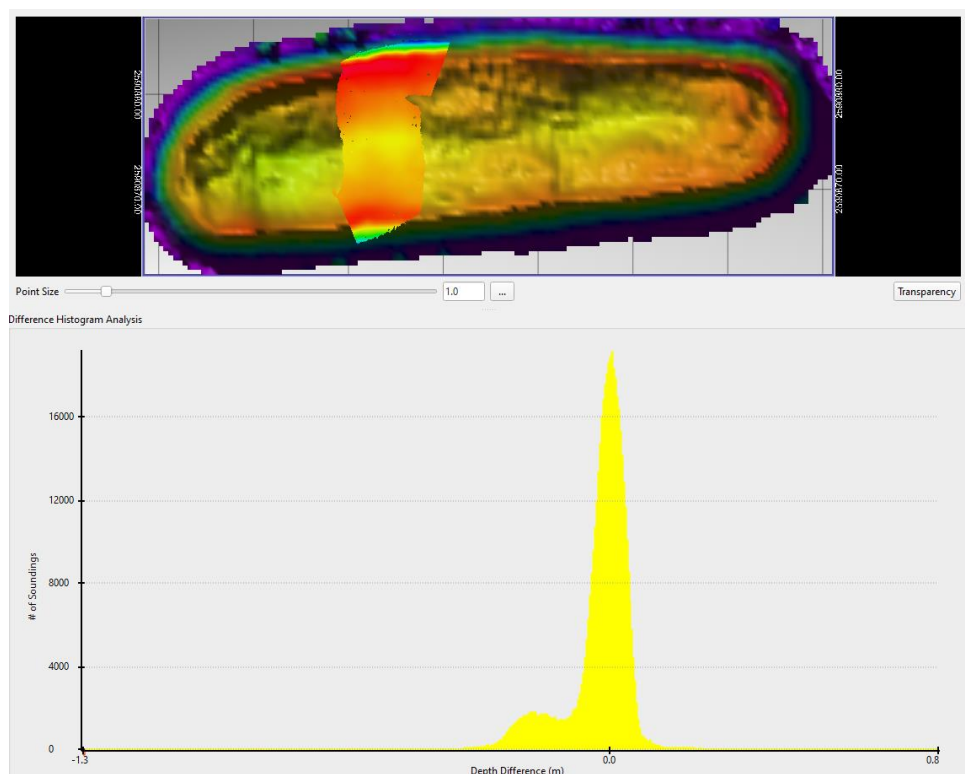


圖 4-9 小艇施測 B 池檢核線分布位置（上）與差值分布（下）

表 4-6 無人船檢核測線點雲資料與全區網格資料之差值統計-A 池

總載入點數	3,662,502		
差值之平均值(m)	0.004		
差值之標準偏差(m)	0.070		
差值範圍(m)	[-0.40, 0.37]		
特等精度誤差極限(m)	0.250		
特等精度合格筆數	3,631,880	合格率	99.16 %
特等精度不合格筆數	30,622	不合格率	0.84 %
一等精度誤差極限(m)	0.500		
一等精度合格筆數	3,662,502	合格率	100.00 %
一等精度不合格筆數	0	不合格率	0.00 %

表 4-7 無人船檢核測線點雲資料與全區網格資料之差值統計-B 池

總載入點數	1,502,521		
差值之平均值(m)	0.019		
差值之標準偏差(m)	0.091		
差值範圍(m)	[-0.56,0.53]		
特等精度誤差極限(m)	0.250		
特等精度合格筆數	1,435,613	合格率	95.55%
特等精度不合格筆數	66,908	不合格率	4.45%
一等精度誤差極限(m)	0.501		
一等精度合格筆數	1,502,377	合格率	99.99%
一等精度不合格筆數	144	不合格率	0.01%

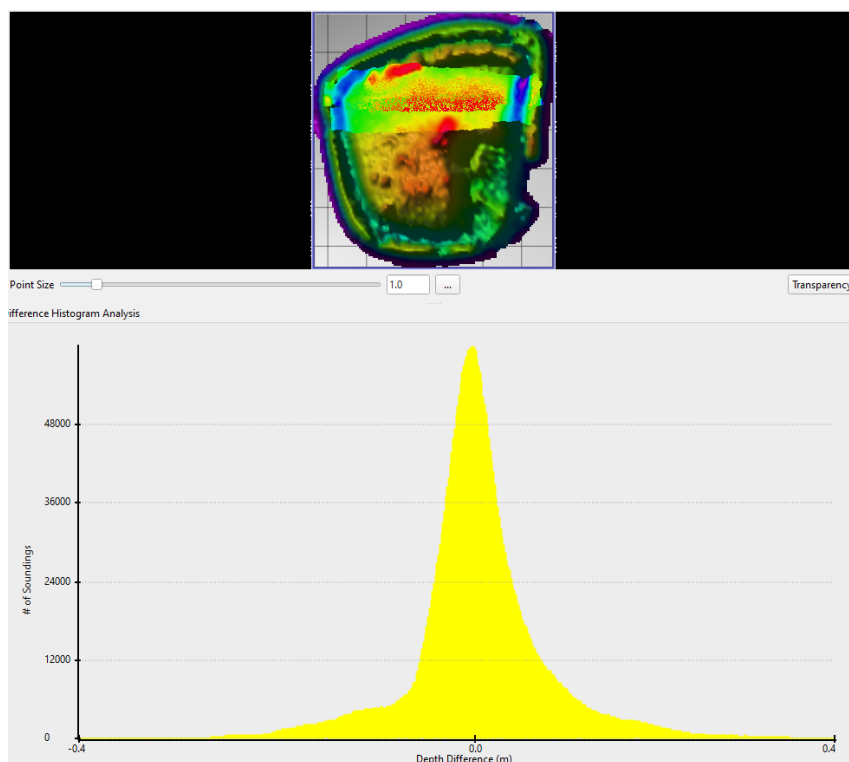


圖 4-10 無人船施測 A 池檢核線分布位置（上）與差值分布（下）

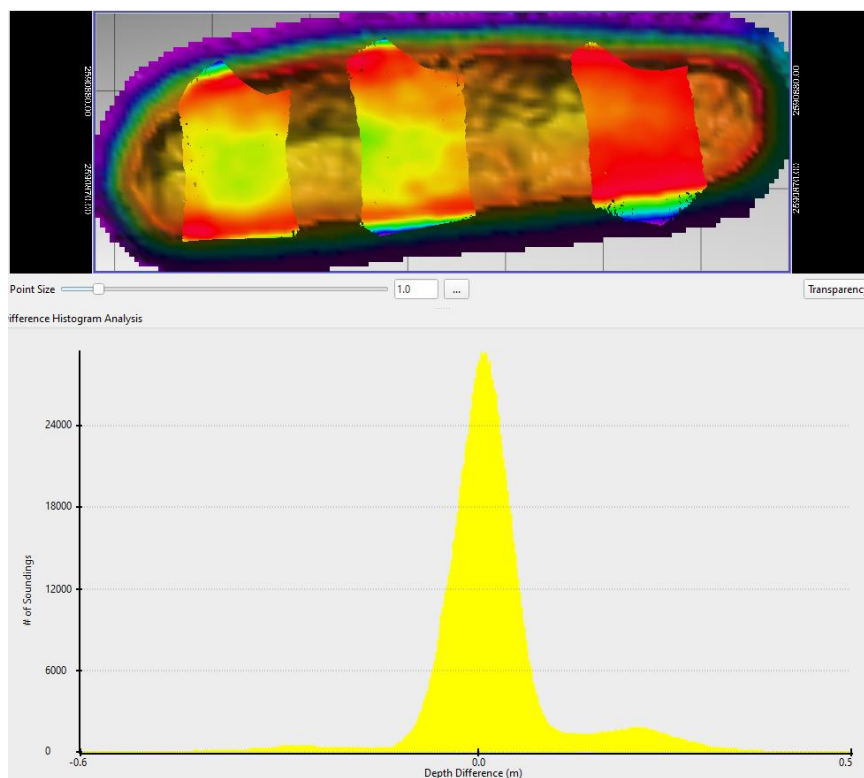


圖 4-11 無人船施測 B 池檢核線分布位置（上）與差值分布（下）

另一方面，為評估水深資料的總傳播不確定度(Total Propagation Uncertainty, TPU)是否滿足 IHO 特等及一等規範，本案採用 CARIS Base Surface QC Report 進行相關計算，小艇及無人船成果如表 4-8 及表 4-9 所示。符合特等及一等規範比例皆為 100 %，殘差平均分別為-0.135 公尺（特等）及 -0.385 公尺（一等），其成果亦符合水深測量規範需求。

表 4-8 小艇施測 A、B 池水深成果總傳播不確定度（TPU）分析

滯洪池	A	B
總檢核點數	12,085	6,246
符合特等規範點數	12,085	6,246
符合特等規範百分比	100 %	100 %
Residual Mean (m)	-0.135	-0.135
符合一等規範點數	12,085	6,246
符合一等精度百分比	100 %	100 %
Residual Mean (m)	-0.385	-0.385

表 4-9 無人船施測 A、B 池水深成果總傳播不確定度（TPU）分析

滯洪池	A	B
總檢核點數	12,888	6,176
符合特等規範點數	12,888	6,176
符合特等規範百分比	100 %	100 %
Residual Mean (m)	-0.135	-0.135
符合一等規範點數	12,888	6,176
符合一等精度百分比	100 %	100 %
Residual Mean (m)	-0.385	-0.385

另外，為進一步驗證水深測量網格成果的準確性，本研究利用農業部農村發展及水土保持署所提供之竣工圖（如圖 3-1），於 A 池中選取 2 個點位（樁號：BC1 及 MC1），B 池選取 4 個點位（樁號：MC2、EC2、0K+150 及 BC3）進行比對，比對流程如下：

1.利用竣工圖之曲線表資訊，透過計算距離與方位角，推算各點位之平面坐標，圖 4-12 為各點位於 A、B 兩池之位置分布。

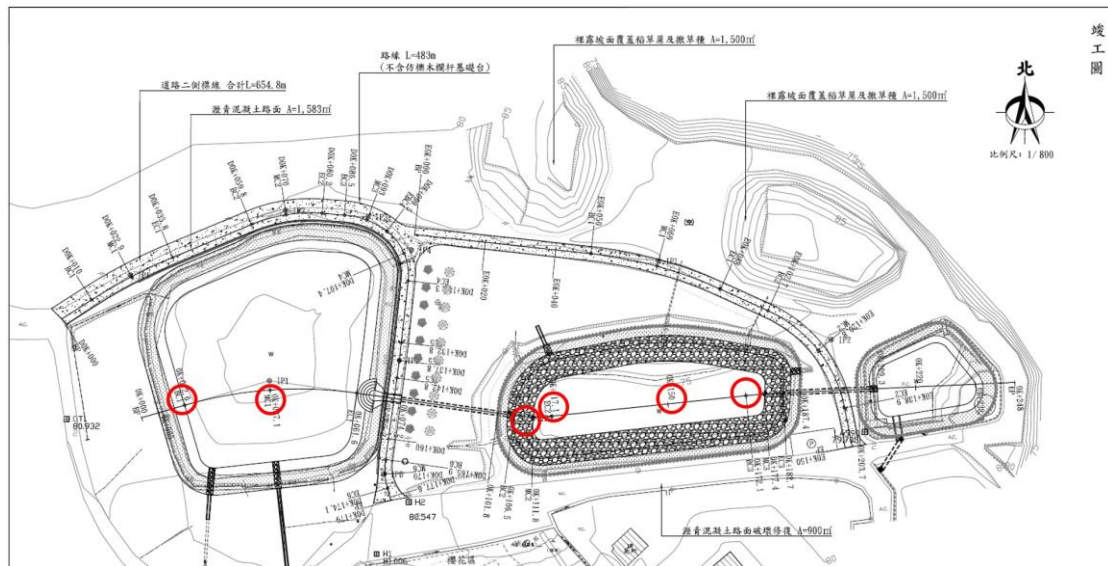


圖 4-12 選取樁號於 A、B 兩池之分布（底圖：竣工圖）

2.利用雙線性內插求得各點位平面坐標於水深測量網格中之正高水深。

3.將上步驟所得之正高水深與竣工圖中之地面高進行差值分析（地面高減去內插得之正高水深值）。

小艇及無人船 A、B 池之分析成果分別如表 4-10 及表 4-11 所示。由成果可知各點位具有不同量級之差值，尤其位於農塘邊緣的樁號，如 BC1 (A)、MC2 (B) 及 BC3 (B)，皆有大於 0.3 公尺的差值，最大差值可達 0.88 公尺，推測原因為邊緣網格成果可能是軟體外插而得，或是由於邊緣淤積或地形變化等原因使得與竣工圖之高程值不符；若是較靠近農塘中心的點位（水深較深處），如 MC1 (A)、EC2 (B) 及 0K+150 (B)，其最小差值為 5 公分，最大差值也僅 11.8 公分，顯示出較靠近農塘中心的點位與水深測量的成果較具一致性。而比較小艇及無人船的成果，其各樁號差值僅 2-3 公分，表示兩次測量成果高度吻合，以及短時間內農塘水底地形並無太大變化，亦可驗證此兩種方法的可靠性。

表 4-10 小艇施測 A、B 池水深成果與竣工圖樁號差值分析

樁號	E(m)	N(m)	蓄水高 (m)	滯洪高 (m)	地面高 (m)	內插 正高 水深 (m)	差值 (m)
BC1(A)	198485.80	2590879.19	79.5	80.5	78.26	77.791	0.469
MC1(A)	198509.88	2590883.45	79.5	80.5	77.00	77.118	-0.118
MC2(B)	198584.01	2590875.89	78.5	79	75.18	74.317	0.863
EC2(B)	198589.35	2590876.13	78.5	79	74.48	74.539	-0.059
0K+150(B)	198622.07	2590879.56	78.5	79	74.51	74.423	0.087
BC3(B)	198644.05	2590881.86	78.5	79	74.45	74.117	0.333

表 4-11 無人船施測 A、B 池水深成果與竣工圖樁號差值分析

樁號	E(m)	N(m)	蓄水高 (m)	滯洪高 (m)	地面高 (m)	內插 正高 水深 (m)	差值 (m)
BC1(A)	198485.80	2590879.19	79.5	80.5	78.26	77.771	0.489
MC1(A)	198509.88	2590883.45	79.5	80.5	77.00	77.089	-0.089
MC2(B)	198584.01	2590875.89	78.5	79	75.18	74.304	0.876
EC2(B)	198589.35	2590876.13	78.5	79	74.48	74.530	-0.050
0K+150(B)	198622.07	2590879.56	78.5	79	74.51	74.411	0.099
BC3(B)	198644.05	2590881.86	78.5	79	74.45	74.137	0.313

最後，本研究亦進行小艇及無人船兩次測量之網格成果比較，其結果如表 4-12 及表 4-13 所示。A、B 池差值平均值分別為 2.9 公分與 -0.2 公分；差值之標準偏差為 8.6 公分與 12.9 公分。

表 4-12 A 池網格成果差值統計（以小艇成果為參考面）

差值之平均值(m)	0.029
差值之標準偏差(m)	0.086
差值範圍(m)	[-0.70, 0.63]

表 4-13 B 池網格成果差值統計（以小艇成果為參考面）

差值之平均值(m)	-0.002
差值之標準偏差(m)	0.129
差值範圍(m)	[-0.56, 1.26]

第三節 水深成果加值應用

執行水深測量作業後，可計算得各滯洪池之網格水深資料，並建立滯洪池之數值地形模型。圖 4-13 及圖 4-14 為利用無人船施測之 A、B 池水面水深網格成果之三維展示，因需展現實際地形高低關係，故在繪圖時將深度值轉為負號，另外因無人船水深成果涵蓋較淺水深，故僅討論無人船水深。圖中可得獲得完整的水底地形變化與滯洪池形狀，而傳統單音束測量或水尺測量僅能提供斷面成果，所以多音束無人船測量可獲取涵蓋範圍較大且詳盡的三維水下地形資訊為其一大優點。若須更進一步進行滯洪池結構監測等工作，可利用三維點雲資料進行分析。

此外，諸如農塘、埤塘或滯洪池等水利設施，了解其蓄水面積與蓄水量等指標更是後續水資源管理的一大重點，故本研究亦透過小艇及無人船水深測量所產製之 DEM 網格並透過不規則三角網（Triangulated Irregular Network, TIN）計算測量當下水位之蓄水面積與蓄水體積，且製作成蓄水能量表（以池底為水位 0 公尺）。表 4-14 及表 4-15 為小艇及無人船成果，圖 4-15 及圖 4-16 為農塘水位與面積(H-A 曲線)及蓄水量(H-V 曲線)之關係。由圖表可見兩者趨勢一致，但所測得之最淺水深有所差異，故於曲線後段數值較不吻合，超過最淺水深以上之蓄水面積則維持定值，蓄水體積則維持等斜率增加。表

4-16 為透過水深處理軟體 CARIS 所計算得之規則網格蓄水面積（當下測量水面）與透過 TIN 所計算得之不規則網格蓄水面積（當下測量水面）之比較，結果顯示透過兩種不同網格方式計算得之蓄水面積呈現一致性。

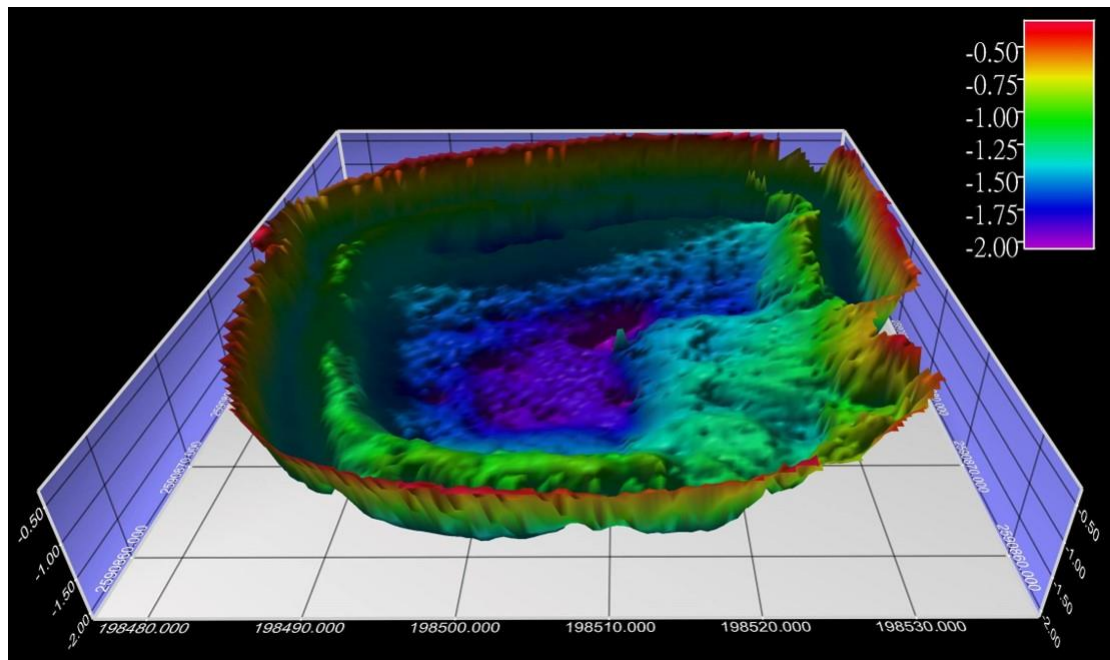


圖 4-13 無人船 A 池水面水深網格三維展示

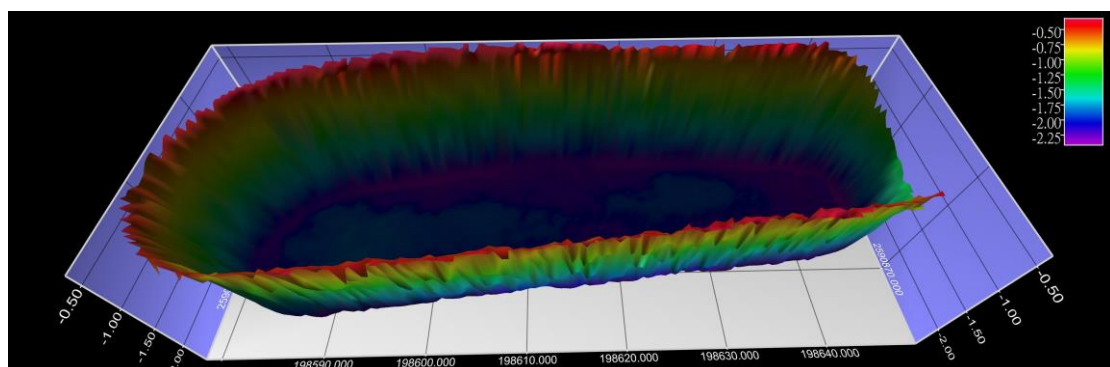


圖 4-14 無人船 B 池水面水深網格三維展示

表 4-14 小艇及小艇計算之 A 池測量當下水面之蓄水能量表

施測方式	小艇		無人船	
水位(公尺)	體積(m ³)	面積(m ²)	體積(m ³)	面積(m ²)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.6	16.6	0.1	5.8
0.2	3.6	51.8	2.2	35.0
0.3	19.2	258.9	12.8	216.6
0.4	59.1	570.9	45.3	479.6
0.5	134.5	920.9	113.5	859.3
0.6	245.6	1299.4	216.8	1221.2
0.7	394.1	1670.9	357.6	1604.2
0.8	577.4	1981.2	537.9	1963.9
0.9	790.5	2295.7	748.7	2265.5
1.0	1034.8	2587.4	990.8	2569.3
1.1	1305.8	2801.5	1261.0	2818.0
1.2	1591.2	2900.7	1547.9	2908.6
1.3	1885.8	2993.2	1842.0	2971.3
1.4	2189.6	3071.5	2142.2	3030.9
1.5	2496.8	3073.1	2448.4	3095.2
1.6	2804.2	3073.1	2761.7	3174.5
1.7	3111.5	3073.1	3084.3	3279.5
1.8	3418.8	3073.1	3416.0	3336.1
1.9	3726.1	3073.1	3749.6	3336.1
2.0	4033.4	3073.1	4083.2	3336.1
2.1	4340.7	3073.1	4416.8	3336.1

表 4-15 小艇及無人船計算之 B 池測量當下水面之蓄水能量表

施測方式	小艇		無人船	
水位(公尺)	體積(m ³)	面積(m ²)	體積(m ³)	面積(m ²)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.2	5.6	0.4	13.7
0.2	2.3	52.3	5.9	126.1
0.3	17.5	314.7	36.8	513.7
0.4	68.6	709.3	107.9	895.1
0.5	156.1	1000.2	207.5	1065.2
0.6	261.8	1087.2	315.3	1088.8
0.7	371.6	1108.6	425.2	1109.2
0.8	483.5	1130.2	537.2	1130.8
0.9	597.7	1154.4	651.4	1153.8
1.0	714.4	1180.6	768.0	1177.8
1.1	833.9	1208.4	887.1	1204.0
1.2	956.1	1237.0	1008.8	1230.6
1.3	1081.3	1265.4	1133.1	1254.6
1.4	1209.2	1294.3	1259.8	1278.6
1.5	1340.2	1327.0	1388.8	1301.4
1.6	1475.0	1371.5	1520.1	1324.1
1.7	1615.9	1465.6	1653.7	1348.7
1.8	1768.6	1543.4	1790.1	1381.0
1.9	1922.9	1543.4	1930.1	1422.4
2.0	2077.3	1543.4	2075.6	1490.0
2.1	2231.6	1543.4	2226.6	1517.5
2.2	2386.0	1543.4	2378.4	1517.5
2.3	2540.3	1543.4	2530.1	1517.5
2.4	2694.6	1543.4	2681.9	1517.5

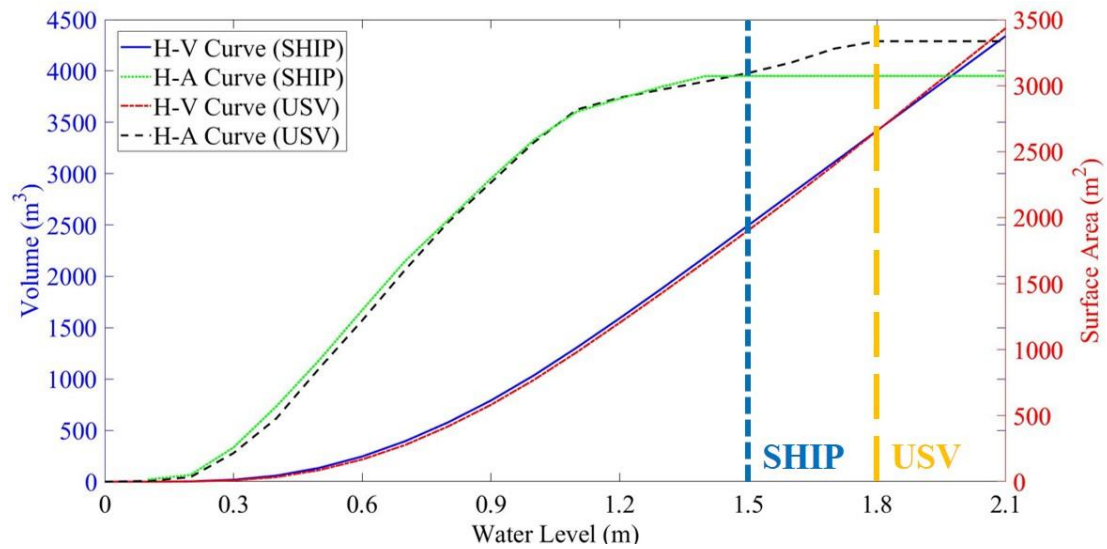


圖 4-15 A 池 H-V, H-A 曲線圖

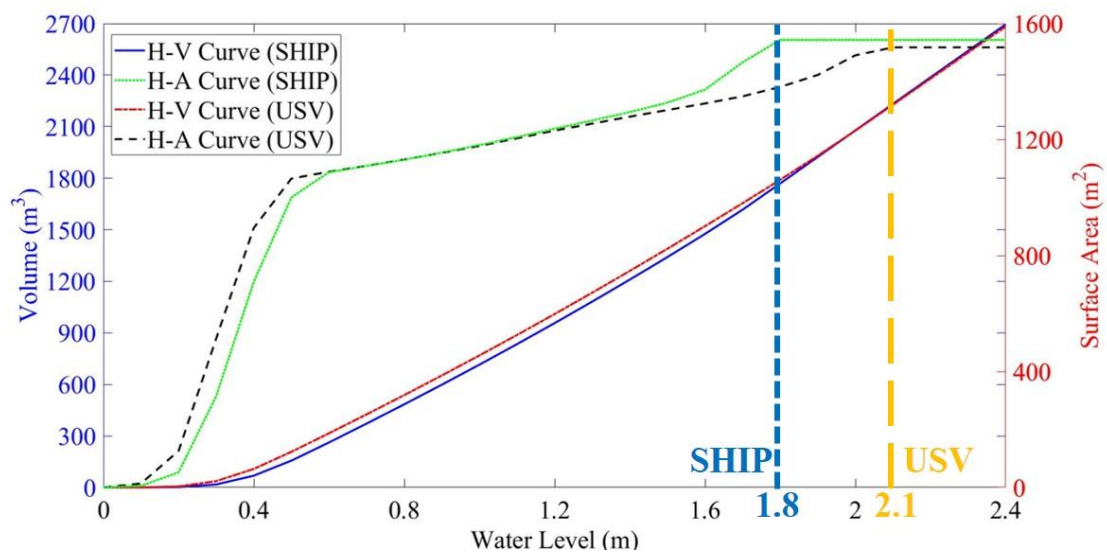


圖 4-16 B 池 H-V, H-A 曲線圖

表 4-16 不同網格計算方法之蓄水面積比較

計算方式	不規則三角網面積 (m ²)	規則網格面積 (m ²)
小艇-A 池	3073.1	3012.5
無人船-A 池	3336.1	3324.5
小艇-B 池	1543.4	1550.25
無人船-B 池	1517.5	1541.5

第五章 結論與建議

本研究提出以無人船或小艇搭載多音束測深儀進行農塘全覆式水深測量作業，並以嘉義澮水溪慈恩滯洪農塘 A、B 池為實驗區域進行兩次不同載具多音束測量實驗。多音束水深資料經檢核測線交叉檢核成果及 TPU 分析皆通過 IHO 特等及一等精度規範，亦與竣工圖進行獨立檢核後確認成果之可靠性，於 A、B 兩池最深處皆可達到約 10 公分的精度，且兩次載具之實驗成果皆展現一致性。另外，透過水深資料所產製之網格可用於計算農塘之蓄水能量表（測量當下水面或其他基準）及繪製農塘之水面與蓄水面積及蓄水體積之曲線圖，可提供後續水利管理單位或相關施政機關參考。本研究充分展現利用無人船或小艇進行農塘（或其他淺水水體）進行水深測量之潛力與未來發展性。

另外，透過本研究之成功範例，團隊建議可繼續將多音束無人船系統導入後續農塘巡檢及管理作業來取代傳統人工量測或單音束之作業模式。多音束無人船系統與單音束及人工量測比對之優勢如表 5-1 所示，其所產製之點雲資料、網格資料可針對不同管理需求進行加值應用，故本團隊針對後續實務執行提供以下幾點建議：

- 1.農塘淤積測量：可依業務單位實務需求定期施測(如一年、颱風季節、高水位時)，多音束資料可提供高精度之水深資料以計算池底淤積量並評估相關清淤作業。
- 2.重點農塘巡檢工作：業務單位可將農塘依重要程度分級進行定期施測以檢測塘體結構安全。
- 3.多音束無人船搭配輕型光達巡檢:輕型光達可量測水上地表地誤點雲，而多音束測深儀可量測水下水深點雲，結合兩者可建置水上水下無縫 DEM。
- 4.建立智慧農塘管理系統：將多音束產製之點雲資料及網格資料導入管理處相關地理資訊系統，以供管理者查詢農塘基本資訊、屬性資料及數值資料，建構完善的智慧農塘管理系統。

表 5-1 多音束與單音束及人工量測比較

項目	多音束系統	單音束及人工量測
點雲資料	是	否
高解析度網格資料	是	否
農塘裂縫、掏空檢測	是	否
農塘結構物辨識	是	否

參考文獻

1. 行政院農業委員會(2020)。水土保持技術規範。
2. 內政部(2022a)。水深測量作業規範。
3. 內政部(2022b)。110-111 年測深無人船辦理水深測量及建置線上精密單點定位服務系統研究工作方案_第3期期中報告。
4. 蔡明發和陳金順，蓄水於塘、滯洪於坡、保水於土、造福於民，農業情報，<https://www.coa.gov.tw/ws.php?id=2509325>
5. 吳約西(2003)。水資源論壇暨水資源保育與管理國土論壇－【永續的水環境】。台中市國立中興大學。
6. 鴻昇工程科技有限公司(2019)，108 年度長濱沿海等集水區農塘盤點調查、評估與初步規劃,水土保持局台東分局期末報告,3-48。
7. 國立中興大學(2019)，108 年度新竹縣浪漫台三線沿線農塘盤點調查、評估與初步規劃,水土保持局台北分局期末報告,4-46~4-53。

附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	<p>一、為配合本局業務需求，計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分： 1. 建議對苗栗農塘研究對象之工程進度要有良好掌握，完工後放水前可先做一次UAV 之影像拍攝以利建立DSM 模型，可供後續比對。 2. 建議至少再找一處農塘是舊有農塘當研究對象，代表目前存在農塘，證實其研究方法的適用性。 3. 建議後續研究說明如何驗證本方法之量測結果，及補充多音束測深儀的使用限制為何。</p>	<p>1.於整合型計畫中，中興大學水保系蕭宇伸教授將於農塘放水前進行 UAV 拍攝，並計算求得 DEM 2. 在經費許可下，將再找一處舊有農塘當研究對象，證實其研究方法的適用性。 3. 利用 UAV 放水前拍攝製作之 DEM 或施工工程圖來驗證本方法之量測結果。若農塘布滿障礙物(打水機和電線、水生植物等)讓無人船或小艇無法航行，則無法進行水深測量。另外，農塘塘底布滿植物等，讓多音束測深儀發射之</p>

項次	審查意見	回覆辦理情形
	<p>二、有關計畫書格式及經費審查部分： 1. 本計畫請以補助經費784仟元調整編列。 2. 本年度執行期限請修正為自112年2月8日至112年12月31日。(10.9個月)。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研究助理，請以計畫執行期限10.9個月內編列。年終獎金亦配合計畫期程。 3. 23-00「按日按件計資酬金」應低於業務費之35%。 4. 「行政管理費」請按計畫經費總額(不含行政管理費)之10%以內調整計算。 5. 預算明細表補充說明中車輛租金前後金額不一致。 6. 參加研討會之註冊費請編列在雜支項下。</p>	<p>音波無法穿透，則無法測到農塘水底地形。 二、有關計畫書格式及經費審查部分： 1. 已修正。 2. 已修正。 3. 已修正 4. 已修正 5. 已修正。 6. 已修正。</p>

項次	審查意見	回覆辦理情形
二	<p>1. 研究主持人費請於「按日按件計資酬金」項下編列，並僅限編列一人，研究主持人費以6,000 元/月為上限。 2.「按日按件計資酬金」(1)應低於業務費35%。(2)二代健保補充保險費費率為2.11%。 3.電話費不得編列。 4.P8(四)計畫經費分攤明細表:備註內容，請刪除。"</p>	已修正。
三	<p>1. 水深資料處理”軟體資金”，應為軟體租金。 2. 附表一「薪俸、研究主持人費明細表」內為填列人事費薪俸及研究主持人費，按日按件計資酬金之博士生免列。</p>	已修正。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	主計室：P8，「26-10雜支」， 2.期中報告書金額計算錯誤。 (期中報告書:\$300元x5本 =\$2,000元，應為1,500元)	已修正為\$400 元 x5 本=\$2,000 元。

附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	目前已成功完成使用小艇和無人船進行農塘水深測量作業，初步產製農塘水下數值高程模型，及成果品質分析，達成期中預期成果。	感謝委員肯定。
二	於期中審查後請加強農塘水深網格成果之三維展示及其應用價值。	已於期末報告第四章:農塘水深成果新增網格成果之三維展示及其應用價值相關內容。
三	請依施作流程圖，簡列各步驟所需軟硬體及其功能。	本案使用的儀器請見第三章第二小節：船體及儀器介紹，另外本案主要使用的處理軟體為 CARIS HIPS and SIPS 11.3 版，功能為處理水深點雲數據。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	目前測試場域於澧水溪慈恩滯洪農塘A池及B池，另於期初技術審查意見回覆承諾將再找一處舊有農塘當測試對象，以便驗證在複雜環境下的適用性，請於下半年完成。	期初技術審查意見回覆若經費許可，將再找一處舊有農塘當測試對象。由於本案已分別利用小艇及無人船施作，尚無充足外業經費可再執行其他農塘。但透過本案利用兩種不同載具施測可進一步驗證成果之可靠性與一致性，另也展現多音束無人船水深測量可涵蓋更多水淺區域。
五	圖4-3及4-4之成果是無人船或是自製小艇所測得之成果？還是2者混合？	期中報告成果係屬小艇之施測成果，無人船施測成果之相關內容已於期末報告呈現。

項次	審查意見	回覆辦理情形
六	一般農塘水深大多小於3 m，是否使用無人船即可？	若農塘中不具有太多影響無人船航行之障礙物（如水車、繩索及水生植物等），透過無人船施測可進行自動化量測，減少作業人力；但若農塘中具有多數障礙物，小艇可由作業人員隨時控制及時避開障礙物，相對來說較為靈活，故本案提出以兩種不同載具進行作業之作業模式，至於該使用何種載具則依現地環境狀況而定。
七	P.3-5，圖3-4操作介面內容是否可分別補充說明，另是否可進一步介紹此軟體，報告書並無提及。	已補充相關內容。

項次	審查意見	回覆辦理情形
八	P.3-6、3-10，請說明聲速計、聲速剖面儀之用途？對於本研究之測深效益？	已補充相關內容。
九	P.3-13，提到船體迴轉不得計算，請說明如何補足此處資料？	P.3-13所提及之程序係為製作海圖之作業規格需求，由於農塘多屬不規則形狀，作業過程中難免會有船隻轉彎情形（如邊緣掃描時），故此情形屬可容許範圍；若於規則區域，則可透過規劃另一方面之測線補充因船隻迴轉而不得納入計算之區域。
十	P.3-15，補充說明最後是使用RTK還是使用PPK？	本案最終船載軌跡解皆利用移動站資料（船載GNSS）與基站進行 PPK

項次	審查意見	回覆辦理情形
		後處理解算。
十一	如農塘有混濁情形，是否會影響測深成果？是否有相關對策？	一般而言，若農塘混濁（泥沙等），可能會造成多音束點雲成果有較多雜訊，但由於農塘一般水深較淺，多音束聲波之能量（Power）及震幅（Amplitude）亦可傳遞至池底。但建議豪大雨或颱風等情形使得水體混濁，進而影響測量精度時，應待混濁物靜置後再實施水深測量作業，以確保作業品質與成果精度。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十二	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/ ）。	已修正。