

結合遙控無人機及吊掛式微型聲納 應用於推估灌溉埤塘容積之探討

Discussion on the application of drone and suspended micro-sonar in estimating the volume of irrigation ponds

桃園市政府水務局	中華民國航空測量 及遙感探測學會	財團法人農業工程研究中心	
科長	執行長	助理研究員	副研究員
葛其民	郭耀程	施學延	洪若彬
Chi-Min Ko	Yao-Cheng Kuo	Hsueh-Yen Shih	Candera Wijaya

摘 要

桃園台地灌區素有千塘之鄉美名，然而隨著石門水庫興建及後續土地利用改變，埤塘數量自日治初期約 6,000 口逐漸縮減至目前約 3,000 口規模，然而隨著時間變化，每年埤塘個數及蓄水量也隨之異動。

本研究結合遙控無人機配合吊掛式微型聲納進行水深測量，微型聲納所獲取之水深值透過最小二乘法計算二次項三維曲面擬合整體埤塘水深。並透過擬合深深值、正射影像所圈繪之埤塘範圍及現地量測而得之堤岸坡度估計該埤塘最大蓄水容積。

為確保微型聲納之良好數據品質，本研究選定一口埤塘於枯水期以無人機拍攝產製之數值地表模型和豐水期以無人機吊掛聲納施測之水深模型進行驗證。驗證結果顯示兩者之埤塘容積值差異小於 3%，可見此研究成果結合遙控無人機和吊掛式微型聲納亦能提高工作效及專業能力並降低成本及水域作業風險。

關鍵詞：遙控無人機，灌溉埤塘，微型聲納

Abstract

Taoyuan table land irrigation area was renowned for its "Town of a Thousand Ponds" moniker. However, with the construction of Shimen reservoir and subsequent changes in land use, the number of ponds has gradually decreased from approximately 6,000 during the early Japanese colonial period to about 3,000 today. Over time, the number of ponds and their water storage capacities have also fluctuated annually.

This study integrates a drone equipped with suspended micro sonar for water depth measurement. The water depth values obtained by the micro sonar is used to calculate a quadratic three-dimensional surface fit for the overall pond depth using the least squares method.

Additionally, the maximum water storage capacity of the pond is estimated through the fitted depth values, the pond boundaries delineated from orthoimages, and the embankment slope measured on-site.

To ensure the high data quality of the micro sonar, a specific pond was selected for validation. During the dry season, a digital surface model (DSM) was created using UAV imagery, and during the wet season, a water depth model was obtained using the drone with micro sonar. The validation results show that the difference in pond volume values between the two models is less than 3%. This indicates that the integration of drone and suspended micro sonar can enhance operational efficiency and professional capability while reducing costs and operational risks in aquatic environments.

Keywords: drone, irrigation pond, micro sonar

一、前言

水資源是國家整體經濟發展的重要因素，由於桃園地區之生活及工業用水需求量逐年成長，在水資源供不應求之情況下，每當水資源短缺時，常將灌溉用水移用至生活及工業用水(邱萬吉，2020)。而桃園台地灌區素有「千塘之鄉」美名此係因桃園台地上有若繁星密布之「埤塘」，這些埤塘具有相當的儲水量，然而隨著石門水庫興建及後續土地利用改變，埤塘數量自日治初期約 6,685 口逐漸縮減至目前約 3,097 口規模(臺灣總督府民政部土木局，1916)。

桃園農田水利研究發展基金會於 2013 與 2014 年研究利用串並聯桃園大圳第 10 與第 11 支線貯水池埤塘增加每日調配水量可達 $58,500\text{m}^3/\text{日}$ 與 $60,000\text{m}^3/\text{日}$ (桃園農田水利研究發展基金會，2013 與 2014)。

因此本研究為推估灌溉埤塘容積，採用微型聲納結合遙控無人機採用吊掛方式測定埤塘水深。微型聲納所獲取之水深值透過最小二乘法計算二次項三維曲面擬合整體埤塘水深。並透過擬合深深值、正射影像所圈繪之埤塘範圍及現地量測而得之堤岸坡度估計該埤塘最大蓄水容積。

二、研究方法

本研究利用無人機配合吊掛微型聲納於現地進行埤塘水深量測，依據現地所蒐集之聲納資料進行埤塘水下深度模型建置，爾後結合現地調查成果進行埤塘的量體估計，完成埤塘最大蓄水容積之推估，研究流程如圖 1 所示。

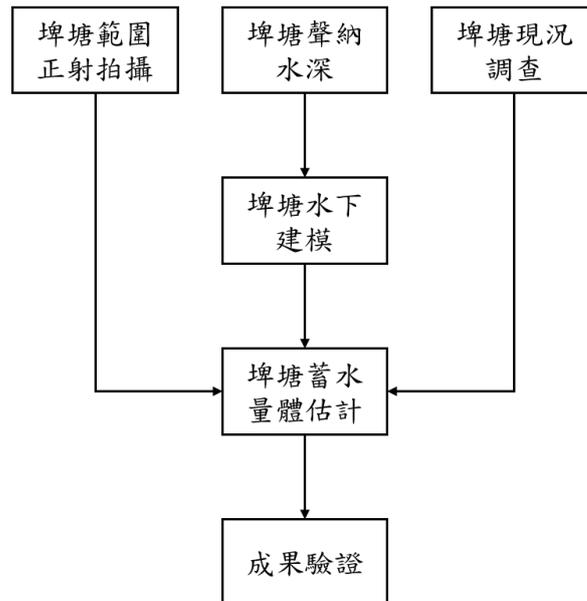


圖 1、研究流程圖

此外所使用之微型聲納因重量極輕，確保施測時微型聲納懸掛於無人機仍能保持飛行平穩，其詳細規格如表 1 所示，由懸掛之智慧型手機以 4G 行動通訊產製之 NMEA(National Marine Electronics Association)格式定位資料提供，其水平精度為 5 公尺；並搭配無人機上 GPS 及 GLONASS 定位系統，整體平面精度約在 1 個像素以內(洪一展、萬泓顯、蔡沛芸、廖婉婷、曾國欣，2019)。

表 1、微型聲納規格表

微型聲納	
尺寸	直徑：66.3 mm；高 66.7mm
重量	89g
連結方式	WiFi
連接範圍	50 m
工作溫度	-20 度至 70 度
探測深度	0.6m 至 45m
聲納頻率	15 幅/秒
電池	1,200mAh

1. 現地作業

本研究利用無人機配合吊掛微型聲納進行埤塘水深量測，現地作業可分為空中航拍、水域水深量測與現況調查等三項作業：空中航拍作業主要收集埤塘之空拍影像用以估計水域面積；水域水深量測則透過無人機配合吊掛微型聲納於水上 1.5 公尺處進行測深如圖 2 所示，結合自行開發 App 整合聲納和行動裝置資訊，包含經緯度、GPS 觀測精度、GPS 接收數據量、聲納觀測數和聲納狀態等如圖 3 所示，而聲納測量點位以每 30 公尺為最大間隔，每處封閉埤塘施測 10 點以上為原則如圖 4 所示；現地作業則量為配合後續蓄水容積計算除量測堤岸坡度外，並量測施測時

水面到出水閘門高差，若施測時能發現出水口且能接近出水口，則量測水面距出水閘門之高度作為此高差，次者若無法接近出水口，則以水尺標示最高水位作為此高差，倘若出水口與水尺皆無，則於地上物建模成果中檢視堤頂道路與未施作內面工之土堤，於其中搜尋高程最低處並視為最大蓄水高度，最為後續計算埤塘蓄水容積之用。



圖 2、無人機吊掛微型聲納施測作業圖

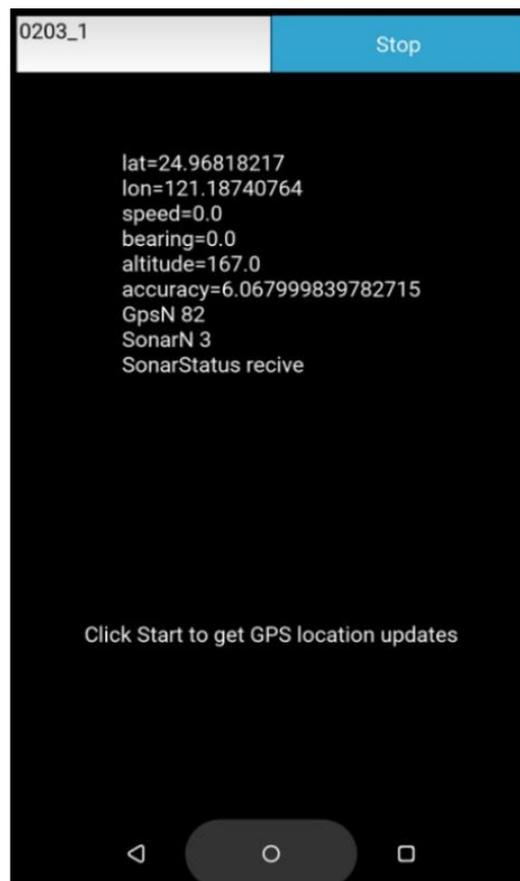


圖 3、App 回傳資料示意圖

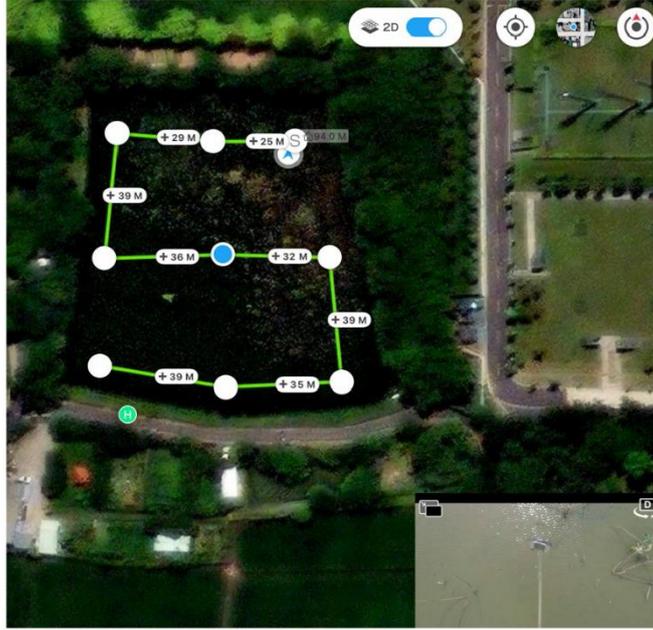


圖 4、聲納測量點為分布示意圖

2. 埤塘量體推算

首先將聲納各測點深度以面狀網格深度以二次項三維曲面擬合公式推算(式 1)，其中 n 為依序施測之點位， x_n 與 y_n 分別為各測點平面坐標， z_n 為經聲納施測而得之各點位深度， a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 為擬合模型之待求係數。另將其以矩陣表示於式 2，並採最小二乘法計算待求係數(式 3)，利用求得係數 \widehat{a}_0 、 \widehat{a}_1 、 \widehat{a}_2 、 \widehat{b}_1 、 \widehat{b}_2 與欲得點位深度之平面坐標 x 、 y ，經計算可得其深度值 z (式 4)。

$$Z_n = a_0 + a_1X_n + a_2X_n^2 + b_1y_n + b_2y_n^2 \quad (\text{式 1})$$

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & X_1^2 & y_1 & y_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_n & X_n^2 & y_n & y_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (\text{式 2})$$

$$\widehat{X} = (A^T A)^{-1} A^T Z \quad (\text{式 3})$$

$$Z_n = \widehat{a}_0 + \widehat{a}_1X_n + \widehat{a}_2X_n^2 + \widehat{b}_1y_n + \widehat{b}_2y_n^2 \quad (\text{式 4})$$

而量體計算時利用上述擬合深度值、正射影像所圈繪之埤塘範圍與現地量測而得之堤岸坡度，進行埤塘三維模型擬合，並採用內積方式估算蓄水容積(式 5)，其中 A 為像元單位面積， D 為整個方陣內插的深度值， M 為影像數化之水體遮罩(水=1；陸=0)， n 、 m 為網格維度， i 與 j 為網格點坐標。

$$\text{施測時蓄水容積} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m A(i, j) \times D(i, j) \times M(i, j) \quad (\text{式 5})$$

由於上述計算為施測當下的蓄水容積，欲求得該埤塘最大蓄水容積，則假設施測時水面到出水閘門高差做為最大蓄水標準，因此若施測時能發現出水口且能接近出水口，並量測水面距出水閘門之高度作為此高差計算最大蓄水容積，若無法接近出水口，則

以水尺標示最高水位作為此高差，倘若出水口與水尺皆無，則於地上物建模成果中檢視堤頂道路與未施作內面工之土堤，於其中搜尋高程最低處並視為最大蓄水高度。

最後透過式 6 估算最大蓄水容積，其中 A 為像元單位面積， D 為整個方陣內插的深度值與堤岸坡度推算之內面工深度變化， M 為影像數化之水體遮罩(水=1；陸=0)， S 為距滿水位之高差， n 、 m 為網格維度， i 與 j 為網格點坐標。

$$\text{最大蓄水容積} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m A(i, j) \times [D(i, j) + S] \times M(i, j) \quad (\text{式 6})$$

D : 為各點深度值生成像元柱狀體，搭配堤岸坡度以埤塘面積為範圍以中心點往外進行反距離加權計算 (距離*0.5*tand(坡度)*-1)。

三、實驗成果

本研究以用觀音地區的兩口埤塘第 10 支線 10-15 號池(GI0211)與第 10 支線 10-9 號池(GI0221)於枯水期以無人機拍攝建置之數值地表模型資料及豐水期以無人機吊掛聲納施測之水深模型資料進行驗證，如圖 5 為兩口埤塘的現地情形比較圖。

首先採用無人機拍攝正射影像製作枯水期之基礎數值地表模型資料(Digital Surface Model, DSM)，如圖 6(上方)所示，待豐水期後、再以無人機吊掛聲納進行水深測量作業，成果如圖 6(下方)所示，成果所見兩種方法水下模型差異不大。再比較兩者所計算出之容積 GI0211 採用本研究方法所測定之容積為 180,375 m³ 而 DSM 所測定之容積為 185,633 m³ 兩者容積誤差在 3% 左右，而 GI0221 採用本研究方法所測定之容積為 103,606 m³ 而 DSM 所測定之容積為 104,737 m³ 兩者容積誤差在 2% 以內。



圖 5、GI0211 與 GI0221 枯水期與豐水期比較(上為枯水期、下豐水期)

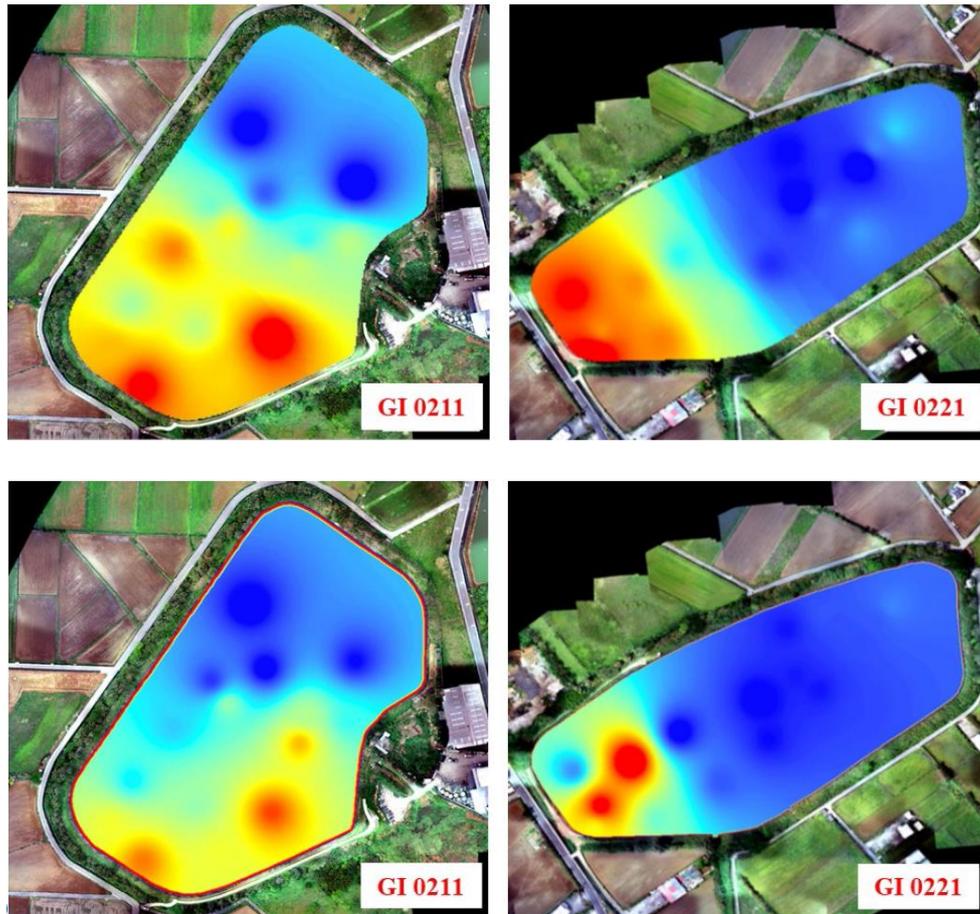


圖 6、施測成果比較(上為枯水期數值地形模型、下豐水期水深模型)

表 2、成果容積比較表

編號	本研究測定容積(m ³)	DSM 測定容積(m ³)
GI0211	180,375	185,633
GI0221	103,606	104,737

四、結論與建議

本研究以結合遙控無人機及吊掛式微型聲納將聲納水深資料以面狀網格深度以二次項三維曲面公式擬合埤塘深度爾後結合正射影像所圈繪之埤塘範圍與現地量測而得之堤岸坡度，進行埤塘三維模型擬合完成埤塘容積之推估並於第 10 支線 10-15 號池 (GI0211) 本研究所測定之容積與 DSM 相比容積誤差在 3% 左右而與第 10 支線 10-9 號池 (GI0211) 本研究所測定之容積與 DSM 容積誤差在 2%。

未來於埤塘灌溉容積可透過遙控無人機及吊掛式微型聲納降低成本，並透過多組裝置提升收集效率。

五、參考文獻

1. 邱萬吉，2020。「埤塘調蓄對於水資源利用效率探討-以桃園大圳 10 支線串聯工程為例」，國立中央大學土木工程學系碩士論文。
2. 臺灣總督府民政部土木局，1916。「臺灣埤圳統計（大正元年度至大正三年度）」，臺北臺灣總督府民政部土木局。
3. 桃園農田水利研究發展基金會，2013。「桃園農田水利會貯水池應用管路串並聯之規劃研究(桃園大圳第 10 支線灌區)」。
4. 桃園農田水利研究發展基金會，2014。「桃園農田水利會貯水池應用管路串並聯之規劃研究(桃園大圳第 11 支線灌區)」。
5. 洪一展、萬泓顯、蔡沛芸、廖婉婷、曾國欣，2019。運用無人飛行載具吊掛簡易聲納測量水體參數，航測及遙測學刊，4(2)：135-146