

以攝影測量方式建立無人機影像曜光模式之研究

李祈叡¹ 王聖鐸^{2*}

摘要

無人機影像和航遙影像同樣會受到太陽曜光影響。雖已有不同方式可最小化太陽曜光對影像的影響，但目前尚不確定過去使用於低空間解析度影像的處理方法，是否能夠有效應用於高空間解析度的影像。

本研究欲於無人機於航線規劃階段，瞭解曜光可能的出現情形。在對研究區域建立地表、太陽及攝影站之空間關係後，研究將進行曜光預估的計算。根據研究之模擬，使用攝影測量方式建立之曜光預估模式可使使用者於航線規劃階段得知曜光於整體影像蒐集過程之分佈，並可依時間、外方位元素之調整要點，為目標飛行時段帶來較佳有效影像蒐集效率之航拍規劃。

關鍵詞：曜光、無人機、攝影測量、飛行規劃

1. 前言

長久以來，限制航遙影像數據品質的最大干擾因素便是太陽曜光 (Sun Glint)，又稱日映或耀光。曜光的出現是由大氣中的冰晶，或水表或地表在特定條件下形成之反射所引起，同時也代表星載或空載感測器接收到不準確的輻射率。它的出現會使影像中部分區域的數據產生誤差或無法使用，導致是錯誤的影像判釋或影像分類的正確。因此過去研究已對衛星或航照影像中曜光之影響進行廣泛討論 (Hochberg *et al.*, 2003、Goodman *et al.*, 2008、Kay *et al.*, 2009、Hossain *et al.*, 2015、Anggoro *et al.*, 2016、Overstreet & Legleiter, 2017、Harmel *et al.*, 2018)，反映影像中的曜光是航遙影像所亟欲避免的要素。Cox & Munk (1954) 從風速與海面波斜率分布關係建立出的曜光偵測方式後，除了在不同載體的感測器影像上被應用與改良 (Mermelstein *et al.*, 1994、Shaw & Churnside, 1997、Monzon *et al.*, 2006)，同時開啟海面波與曜光關係方面之研究 (Ottaviani *et al.*, 2008、Zhang & Wang, 2010)，並且也被應用於曜光改正技術中前置曜光預估模式建立 (Wang & Bailey, 2001、Lyzenga *et al.*, 2006)，開啟曜光處理之相關研

究。

而隨著無人機問世並開始大量被應用在海洋及水域調查中，其影像亦會受到曜光的影響，並且在其應用過程無可避免的需要面對曜光所帶來的問題 (Hodgson *et al.*, 2013、Stow *et al.*, 2019、Windle & Silsbe, 2021)。儘管已有研究以使用於衛星影像之的曜光改正方式切入，使用近紅外線波段處理無人機影像 (Hossain *et al.*, 2015)，但該方法於有底棲基質的水域下，會因近紅外線與短波紅外線波段之訊號較高而影響該模式之處理結果，並可能存在過度改正問題 (Muslim *et al.*, 2019)。且在消費級無人機中，有搭載除可見光波段以外感測器的機型仍未完全普及，該方式無法為缺少這方面資源之使用者所用。

因此除了從曜光改正的角度出發，亦有研究以深度學習開發偵測影像中曜光的方式 (Giles *et al.*, 2021)，或利用不同天氣資訊作為變量來避免曜光並獲取較佳品質影像 (Doukari *et al.*, 2021) 等非改正方式對曜光進行處理。同時，無人機良好的操作彈性使使用者得以透過事先預估或航線規劃上的調整，來改善所蒐集影像的品質或影像應用的成果 (Dhanda *et al.*, 2018、Manconi *et al.*, 2019、

¹ 國立臺灣師範大學地理學系 碩士

² 國立臺灣師範大學地理學系 副教授

* 通訊作者, E-mail: sendo@ntnu.edu.tw

收到日期：民國 113 年 01 月 17 日

修改日期：民國 113 年 02 月 19 日

接受日期：民國 113 年 03 月 13 日

Papadopoulou *et al.*, 2021), 顯示事前針對不同需求進行調整, 是提升無人機影像品質的一種有效方式。若欲以事先對曙光進行預估的角度避免影像中的曙光, Frulla *et al.* (1995) 研究中整理出以光照幾何和觀測幾何關係的建立曙光預估方式, 曾被作為排除曙光標準 (Giglio *et al.*, 2003) 或是避免飛行路徑影像出現曙光的應用角度 (Mailhe *et al.*, 2004), 處理衛星影像中曙光出現的問題。

綜合前述討論, 若根據使用目的上的不同, 曙光亦可以預估、避免的概念, 開發對應時間及處理成本的避免方式, 減少曙光影像的出現並維護影像及應用成果的品質。而根據無搭載可見光以外波段感測器無人機的飛行高度以及主要的應用環境, 該高度下較不易受到大氣所產生之曙光干擾, 且在人口密集區域的使用彈性較小, 相對不易面臨地表人造物質所產生的曙光資訊。且在無人機應用中, 亦常面臨到目標區域出現水體之情況, 影像中水體的曙光成為此類無人機影像在應用上主要面臨到的威脅。故本研究希望於無人機航線規劃階段, 針對水體出現之曙光, 透過過去研究所提出, 以及研究中自行嘗試的曙光預估模式, 求出目標可飛行時段下出現最少曙光的時段。同時嘗試歸納出對飛行規劃調整時, 是否可依循特定概念可以最大程度避免曙光出現在影像中。期望透過以上概念避免飛行任務結束後出現在航照影像中的曙光總量, 降低後續去除曙光作業成本。

基於以上動機, 本研究目的可分為下列四項:

- (1) 驗證研究中之曙光預估方式是否能反映實際曙光出現情形。
- (2) 模擬外方位元素與時間之調整, 瞭解不同調整方式導致之影響。
- (3) 歸納避免曙光方式之調整通則。
- (4) 完成曙光預估模式之建立。

2. 研究方法

2.1 研究流程

本研究期望在無人機航拍前透過曙光預估模式的計算, 事先得知曙光在指定時段下之出現情形。

並瞭解是否可以透過相片外元素及時間的調整, 避免曙光的出現, 確認蒐集到的影像資訊能正確被保留。

基此, 本研究完整的研究流程如圖 1 所示。首先研究將於縣市政府允許且含有水體之飛行區域, 進行曙光影像蒐集。完成蒐集後將影像以 Pix4D Mapper 進行處理得到相機內方位與該次飛行下的攝影站外方位資訊。研究首先需驗證曙光預估模式所計算出之成果是否能符合實際狀況, 因此將使用前述處理而得之內、外方位資訊, 並搭配自開放街圖 (OpenStreetMap, OSM) 搜尋而得的水體資訊進行曙光預估之計算, 最後根據預估的曙光範圍搭配實際曙光情形進行討論, 同時模擬外方位元素改變時曙光於影像中的變動情形。下一步將設計實驗, 驗證曙光預估模式是否能搭配時間推移及外方位元素的調整帶來出現成果上的改變, 並根據設計實驗所帶來的變動, 對航線上的調整方式歸納出可依循的調整方式。最後將曙光預估模式應用於已完成之實際航拍專案中, 討論過去航拍專案在飛行前是否能以可行之對應方式進行調整, 以帶來較佳之影像品質。

以上為本次研究之整體流程。研究中曙光預估的計算和閾值設定需要經過實際驗證, 因此在流程中配合實際的原始曙光影像和設計的實驗進行處理。完成驗證後, 若計算方式或閾值設定能反映正常航拍設定下的曙光出現情形, 則本研究對曙光預估模式期望之實際操作的流程, 是在航線設計階段, 根據設定下之攝影站和飛行範圍內的水體, 進行曙光預估。在得知該階段設定下的曙光出現情形後, 再進行航線規劃或飛行時間的調整, 最終得到一組受曙光影響最少的實際影像。

2.2 研究區域

本研究主要欲探討與處理之方向為無人機影像在水體範圍下產生的曙光, 同時希望飛行之場域為縣市政府公告可進行飛行活動、航高限制為 400 呎 (120 m) 以下之空域, 因此本研究之區域設定為新北市樹林區鹿角溪人工濕地, 於此區域進行平靜水面曙光影像之蒐集。

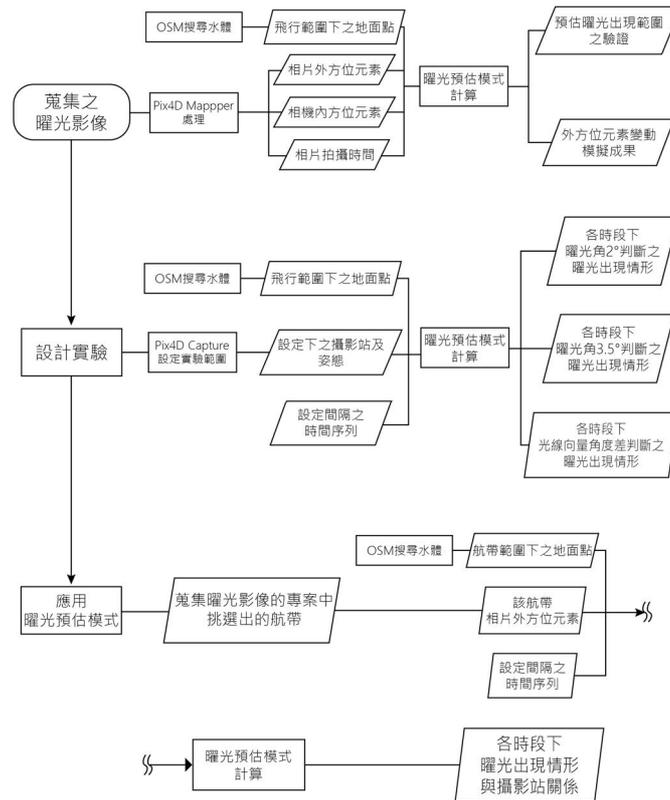


圖 1 研究流程圖

鹿角溪人工濕地位於新北市樹林區，地處大漢溪與支流鹿角溪會合處，是一由原台北縣政府河川高灘地維護管理所打造之人工濕地。濕地透過鹿角溪上游所設置之聯絡管，對鹿角溪河域之污水導入濕地中進行處理。同時由於鹿角溪豐枯流量變化大，因此濕地中亦有導入箱涵的放水流作為補助水源，以維持濕地在旱季的基本水量。該濕地透過自身濕地特性提供水生、陸生、兩棲生物棲息，並達到涵養水源、抒解附近流域豐枯季節流量變化大的現象。

透過鹿角溪人工濕地所提供面積適宜之水體，同時該處地勢平坦、海拔落差微小，利於蒐集大範圍水體影像，故選擇此區域進行曙光影像的蒐集，並進行實驗模擬之操作。

2.3 蒐集曙光影像

由於過去曙光預估模式之計算多應用於低空間解析度之影像中，此類方法應用於無人機影像時，仍未有研究歸納出不同條件下對應之判斷閾值。因此本研究以嘗試的角度，使用實際的曙光影像進行處理，尋找目標條件下可行之判斷閾值。

研究中的影像蒐集是透過 Parrot Anafi 無人機

進行飛行，該款無人機的硬體規格如表 1。所搭載之感測器僅能接收一般可見光波段，而在蒐集影像時可透過內部搭載之 GPS 及 GLONASS 兩種全球導航衛星系統 (Global Navigation Satellite System, GNSS)，在拍攝當下記錄各相片之經緯度與高程。

在該次影像蒐集之飛行規劃中，是以大漢溪左岸鹿角溪人工濕地一側之範圍內，針對濕地水體群、些許壘球場範圍及部分大漢溪河道等目標，劃設長軸為東北-西南走向之多邊型飛行區域 (圖 2)，以交叉航線、80%的前後及左右重疊率，搭配混合飛行高度的方式，在飛行時以 4 cm 與 2.85 cm 之地面採樣距離 (Ground Sampling Distance, GSD) 進行拍攝任務。曙光影像之蒐集於上午 10:00 至上午 11:30 間進行，拍攝 932 張影像。完成飛行並取得影像後，將所收集到之影像匯入 Pix4D Mapper 進行處理，求解出各攝影站之外方位元素，再自影像之 EXIF 檔擷取各攝影站之拍攝時間，完成曙光影像及其資訊之蒐集。此次蒐集之曙光影像，在研究中將使用於光線向量角度差閾值之建立，以及驗證曙光預估出現範圍的實驗中。

表 1 Parrot ANAFI 無人機身及感測器規格表

性能	規格	性能	規格
重量	320 g	感測器類型	1/2.4" CMOS
最大水平移動速度	15 m/s	感測器大小	(6.0, 4.5) mm
最大垂直移動速度	4 m/s	有效像素	5334 x 4016 pixels
最大承受風速	50 km/h	焦距	4.034 mm
最大飛行時間	25 min	像主點位移量 (x, y)	(-0.0077, 0.011) mm
最大連接範圍	4 km	鏡頭畸變差 (k1, k2)	(0.0000089012, -0.0000054908)

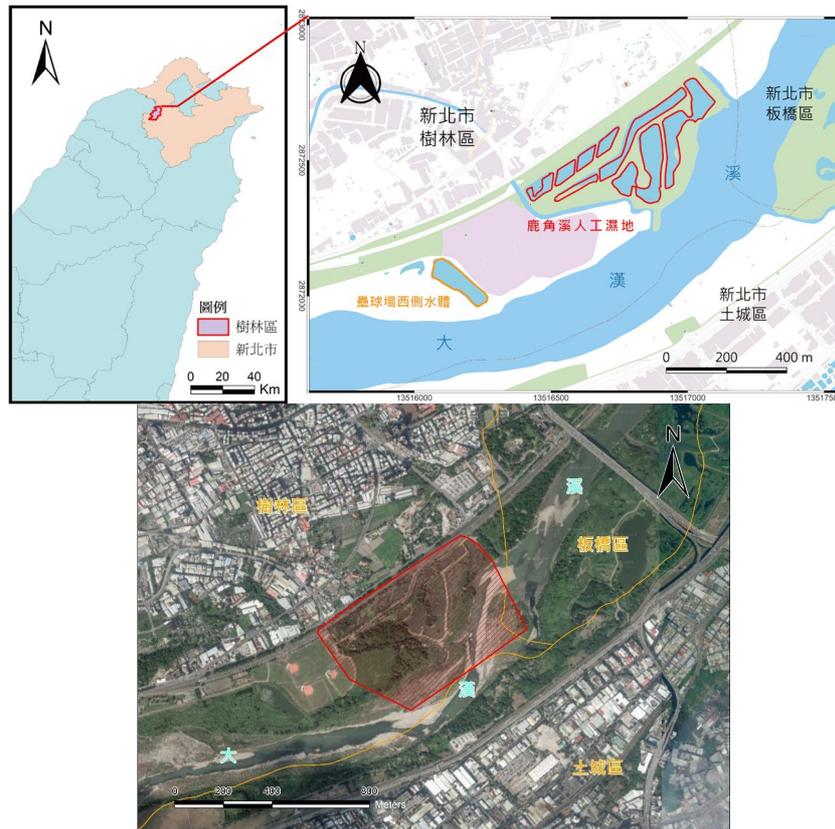


圖 2 鹿角溪人工濕地地理位置圖與蒐集曜光影像飛行範圍示意圖

2.4 建立資料輸入模式

為維持曜光預估之計算效率，故研究中將建立統一的資料輸入模式，確保當飛行區域改變時，可使用固定方式取得相同格式之資訊以利研究運算進行。而根據計算所需之資訊，將可分為攝影站與實體空間中水表之資訊。本研究將對此兩項資訊分別建立固定之取得方式。

首先，研究以 iOS 版本之 Pix4D Capture 做為無人機航拍規劃之軟體。於軟體中繪製飛行範圍並設定各項飛航任務規劃參數後，專案檔將產生前述設定下對應之航線資訊。其檔案格式類型與 JSON 相似，故可以固定方式對檔案內資訊進行擷取。因

此，透過桌上型裝置打開該專案檔後，可對專案檔中屬性名為「Location (各攝影站坐標)」與「Camera Orientation (攝影站外方位元素)」之兩項資訊進行擷取，將其進行儲存作為接下來曜光計算中攝影站部分之資訊。

當完成攝影站資訊的收集後，由於若欲對影像中水面的逐一像素依據其對應至實體空間之坐標進行曜光預估之計算，會形成大量的運算成本。故本研究以對水面進行採樣的概念，對影像中水體的部分，根據規劃之飛行高度以對應適當邊長的網格大小進行規則切割，得到水面範圍的水面點進行曜光預估之計算。因此，針對該航線規劃下飛行範圍

內所有的水體位置，可透過飛行規劃後所產生出飛行範圍的坐標資訊，以 QGIS 中的 QuickOSM 套件，透過 Overpass API 以對應的標籤下載開放街圖中的水體數據。如此便可避免航拍前若僅透過傳統航測影像或衛星影像進行水體判釋時，可能無法滿足無人機飛行尺度的水體資訊需求的問題。完成下載的水體即以 Shapefile 形式被儲存，並再根據實驗需求進行規則切割，得到點形式之 Shapefile。

完成水體資訊蒐集後，將根據不同實驗設定下的飛行範圍規模及航高，對水體以對應邊長之方格進行規則切割，來得到可用於後續計算中的對應規模水面點資訊，達到在飛行前可以以合理計算時間得到曙光出現資訊的目的。此時所得之水面點尚無高程資訊，故在研究中需進一步搭配數值地形模型 (Digital Terrain Model, DTM) 擷取該點位之高程資訊。由於網格間距小於等於 5 m 之成果為一般公務機密，因此研究中先以內政部 20M DTM 資料進行處理，得到包含高程之水面點資訊。

2.5 曙光預估之計算

預估曙光於影像中分布之討論，在過去衛星與航照影像研究中的討論多以水面波角度切入進行討論與應用；但無人機在單次航拍任務下所得之影像數量與空間解析度，皆與前者不同，同時大量的影像亦涵蓋到不同時間下環境的變量，使得此類方式若欲應用於無人機影像時，會依據影像數量涉及到對應的計算規模，創造出龐大的計算成本。因此

本次研究中假定飛行時水面為均質穩定、趨於鏡面的狀態。因此首先將根據實際攝影成果或實驗設定下所產生的對應內、外方位元素，對飛行範圍下所有水面點與各攝影站之間進行曙光預估。

將所得之水面點，根據該次航拍任務規劃出的各攝影站外方位元素，以共線方程式 (Collinearity equation) 計算出水面點在各攝影站中的成像情形後，同時得到有成像水面點於影像中之影像坐標，並再單就有成像之水面點進行曙光預估之計算。研究中曙光預估模式的計算，將利用過去研究中歸納出的曙光角概念，搭配本研究自行嘗試之光線向量角度差之計算方式來進行，並根據各計算方式下不同閾值設定之成果進行模擬及討論。

2.5.1 曙光角

本研究使用 Frulla *et al.* (1995) 所整理出之曙光角 (glint angle) 公式，進行水面點在不同時刻、不同攝影站下的曙光角角度值計算：

$$\cos \theta_g = \cos \theta_v \cos \theta_s - \sin \theta_v \sin \theta_s \cos \phi \dots\dots(1)$$

公式中各角度關係如圖 3 所示，其中， θ_g 代表地表與感測器之向量和反射向量所形成的夾角， θ_v 、 θ_s 分別代表水面點與感測器或太陽之間的天頂角角度值， ϕ 代表感測器與太陽之間的方位角差，此項參數可經 α_s 與 α_v ，即水面點與感測器和太陽間的方位角角度值計算而得。

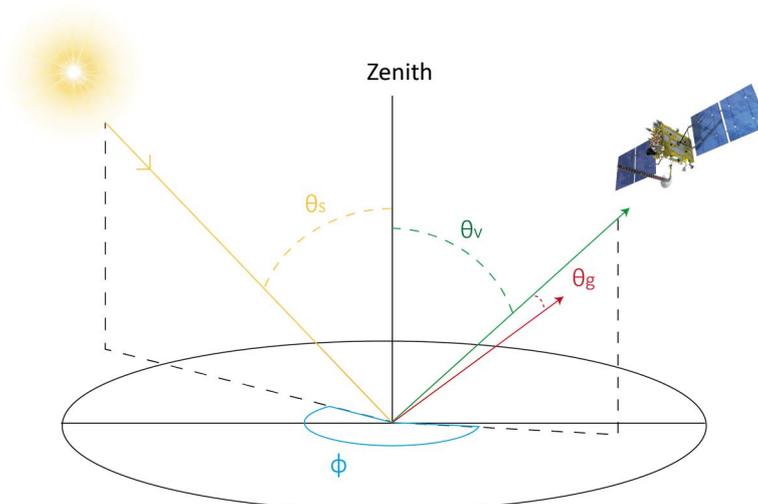


圖 3 曙光角公式中各夾角 3D 示意圖

而此模式下的各項參數的計算方式，可分為： θ_s 、 α_s 是根據美國國家海洋暨大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 所提供，計算各時段下太陽方位之方式。該計算方式可計算出目標時間下，考量粗略大氣折射影響後該地點與太陽之幾何關係； θ_v 、 α_v 是以水面點坐標和攝影站坐標，依其空間關係以三角函數進行推導。最後可得各攝影站中有成像水面點之曙光角 (θ_g) 角度值，曙光角角度值越小，該水面點在影像中越有可能屬於曙光的一部份，反之則否。而判斷水面點是否為曙光的標準，將分別根據過去研究及目前實驗結果，以曙光角小於 2 度 (Giglio *et al.*, 2003) 及 3.5 度作為判斷是否為曙光之標準。

2.5.2 光線向量角度差

因本次研究假定水面趨近於鏡面狀態，因此若有一水面點和一攝影站之間的天頂角角度值 (θ_v) 於特定時間下和太陽間的天頂角角度值 (θ_s) 趨於一致；同時水面點與該攝影站之方位角 (α_v)，於該時間下和太陽間的方位角 (α_s)，兩者角度差趨近於 180° 時，該水面點在影像中應落在曙光出現的範圍下。但曙光於影像中的出現形式應為一範圍而非單一點位，故影像中曙光可能的出現範圍，可能會落在地表與太陽及攝影站所形成的天頂角角度差及方位角角度差所形成的範圍下。因此在本計算中，將對天頂角角度差與方位角角度差分別設定閾值，以兩種角度差落在多少度內的水面點，組成影像中曙光的範圍。

而關於如何此計算下兩種角度差的判斷閾值，天頂角角度差的判斷閾值為根據研究中嘗試而得之經驗，以固定數值 2° 進行判斷；方位角角度差的判斷閾值，係透過研究中建立之迴歸關係，作為曙光在影像中不同出現位置下，方位角角度差的判斷閾值。迴歸關係是透過多張曙光影像中，「曙光中心距像主點的距離」與「通過曙光中心的曙光長軸長度和像主點形成之角度」建立而成。

本研究以曙光影像中曙光中心之影像坐標，搭配影像中曙光所形成最長、並有通過曙光中心的曙光長軸長度，根據該長度與像主點建立成幾何關係

後，可得到該距像主點距離下曙光範圍和像主點所形成的角度。獲得多張曙光影像下之此兩種資訊後，將曙光中心具像主點距離作為自變數、曙光範圍與像主點所形成之角度作為應變數後，以簡單線性迴歸建立出迴歸關係，迴歸關係的示意圖如圖 4 所示。透過此迴歸關係，可以尋找一攝影站中在目標時間下與太陽天頂角達成一致的水面點，在影像中成像後和像主點之間所形成的距離。而將其輸入至迴歸式，便可得知一攝影站中，以方位角角度差為零的軸線為起點夾多少度的範圍內，可能會是曙光出現的範圍。該範圍下有成像的水面點，在影像中就會屬於曙光的一部份，形成透過方位角角度差閾值判斷而得的水面點位。

而此計算方式的完整過程，將先後對水面點與攝影站和該時間下太陽幾何所形成的天頂角角度差與方位角角度差進行計算。若兩個角度差皆落在設定的判斷閾值內，則預估該水面點在該時段、該攝影站中成像時，為曙光的一部份。

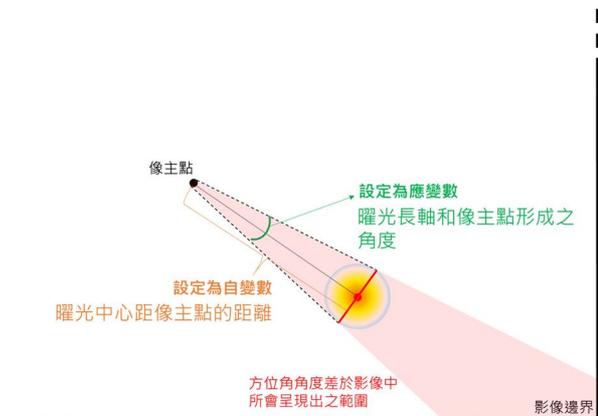


圖 4 方位角角度差判斷閾值之迴歸關係建立圖

3. 實驗成果討論

3.1 驗證曙光預估出現範圍

進行實際應用與討論曙光預估成果前，本研究將確認及驗證曙光預估成果於原始影像中所組成之範圍是否能反映實際曙光出現情形。因此本研究將挑選指定曙光影像，完成曙光預估之計算後根據判斷為曙光之水面點的影像坐標，透過 Python OpenCV 套件將預估曙光範圍投至原始曙光影像中，

觀察預測範圍與實際耀光出現範圍之差異。惟研究受限於沒有蒐集到傾斜攝影的實際耀光影像，來驗證耀光計算成果在傾斜攝影影像上的實際情形，故此節將主要以垂直攝影的實際耀光原始影像進行討論。

本次研究選擇檔名為 P3391953.jpg 之影像，搭配 1 m 網格邊長而得之水面點，以此設定模擬及驗證預測耀光出現範圍。而所呈現之耀光成果，將以耀光水面點之成果投影回原始影像上後，透過 OpenCV 中之 Convex Hull 函數，計算耀光水面點之影像坐標所形成之凸包範圍後，將凸包範圍進行繪製，所呈現出之成果即為耀光水面點在影像中之原始影響範圍。實際模擬之成果如圖 5 所示。

根據圖 5(a)、5(b)可發現耀光角 2 度與 3.5 度於的判斷成果於原始影像中呈現近似角錐截面之形狀。其中耀光角 2 度的判斷成果可以涵蓋原始影像中耀光太陽本體的部分，且無將非耀光的部分判斷為耀光；耀光角 3.5 度成果涵蓋耀光太陽本體部分以及部分耀光光暈，但耀光預估範圍有部分落在原始影像中植物部分的像素中。儘管植物下方確實為水範圍，但研究未取得植物三維高度模型，故未將此成果視為誤授。此兩種成果皆未能涵蓋至耀光外圍光暈，故其成果中仍有漏授情形發生，其中以 2 度的情形較為嚴重。同時可以觀察到兩成果判斷範圍於左下角部分有明顯不自然的直邊，該情況是因目前設定下規則切割所得的水面點無法完整涵蓋至水面範圍角落所致。而根據耀光角的兩種成果，可以得之耀光角 3.5 度可作為較保守的耀光範圍判斷閾值，在水面條件或飛行設定變動時，仍可以反映一定程度耀光出現情形。

相較於耀光角判斷成果，光線向量角度差判斷的結果在原始影像上呈現近似弧形的範圍 (圖 5(c))。判斷區域涵蓋耀光的太陽中心部分以及部分方向上的耀光光暈，然而在朝影像邊緣一側，判斷範圍未能涵蓋耀光部分太陽本體及外圍光暈的範圍，說明有漏授情形發生。判斷範圍與前一判斷成果同樣皆有部分落在影像中植物像素下，但沒有視為誤授之理由亦與耀光角 3.5 度成果相同。藉此成果可知

光線向量角度差預估成果在垂直攝影下可反應部分實際耀光出現情形。

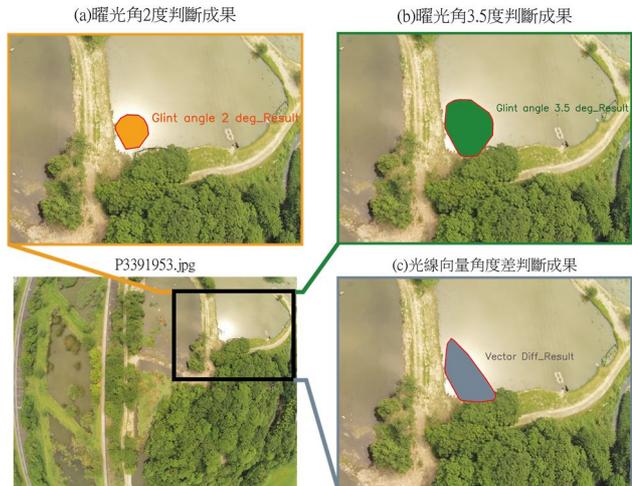


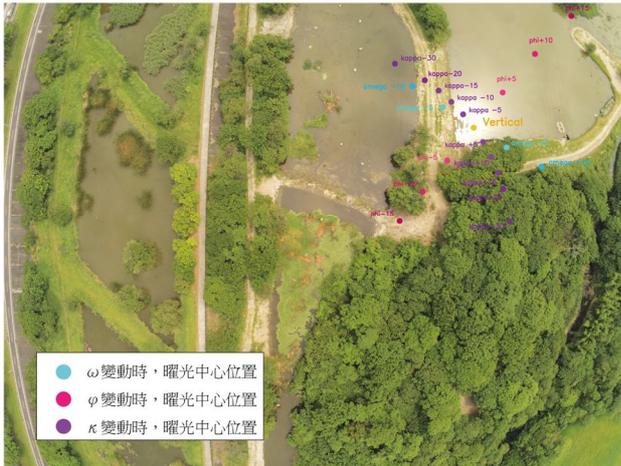
圖 5 耀光預估成果 (a) 耀光角 3.5 度、(b) 耀光角 2 度、(c) 光線向量角度差投影至實際耀光影像示意圖

表 2 模擬外方位元素變動之各元素角度範圍
外方位元素模擬角度 (單位: Degrees)

ω	$\pm 5^\circ, 10^\circ$
φ	$\pm 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$
κ	$\pm 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$

同時，本研究挑選 P3391953.jpg 隔壁航帶之 P3401994.jpg 影像，進一步討論當進行外方位調整或外方位元素出現一定程度之誤差時，會對同一專案中不同航帶上的影像造成何種影響。本次外方位元素模擬的角度範圍如上表 2 所示，實際模擬成果則如圖 6 所示。根據此階段模擬成果，可以觀察到在該次飛行所設定的航高下，當 ω 或 φ 在任一方產生 5 度的變化時，在兩影像中耀光中心所產生的位移量皆超過 300 個像素，大於 κ 產生 5 度變化時所造成的像素位移量。而 ω 或 φ 的變動可以較直接的反映鏡頭偏離天底的程度，因此在同樣變動角度下其所造成的耀光中心偏移量，會較 κ 變動時多。透過外方位元素偏移或誤差的模擬成果，可以得知在時間固定、太陽幾何不變的情況下，相片外方位元素的變動亦是決定耀光於影像中出現位置的重要因素。

(a) P3391953.jpg 模擬成果



(b) P3401994.jpg 模擬成果



圖 6 使用(a) P3391953.jpg 與(b) P3401994.jpg 影像，模擬外方位元素變化造成曙光中心位置改變示意圖

根據此節模擬成果得以瞭解曙光預估計算可一定程度重現平靜水面下之曙光出現情形，並得知當外方位元素出現變化，如進行傾斜攝影或改變航帶方向時，會為航拍專案中的曙光出現情形帶來不一樣的成果。

3.2 不同條件下，曙光出現情形變化之模擬成果

3.2.1 實驗區域與航帶方向模擬之設定

完成曙光預估範圍之驗證後，本研究進一步以不同於原始影像蒐集之區域進行新一輪的實驗，採用模擬而非實際收集影像的方式，以探究不同鏡頭傾斜角度和不同航帶方向下，一日內各時段曙光出現的情況。並瞭解當進行相片外方位元素調整時，航拍專案中曙光出現情形隨時間推移之變化。

本節模擬以鹿角溪濕地西南方的單塊水體為主要飛行區域。在此範圍下，首先將透過 Pix4D Capture 以矩形方式進行飛行範圍設定，設定一面積 $42,355 \text{ m}^2$ 之範圍。航帶設定為東西向，搭配 80% 的前後重疊、70% 的側向重疊，以地面解析度 4 cm 之高度進行模擬，以此作為本節模擬之設定和作為計算使用資訊。東西航向模擬設定示意圖如圖 7(a) 所示。同時，本節模擬中亦嘗試改變航帶方向後，不同鏡頭傾斜角度的曙光出現情形。故將以同樣飛行範圍大小、重疊率和航高，將航帶方向調整為西北

-東南走向後，進行第二階段之模擬。此階段模擬設定示意圖如圖 7 (b) 所示。兩階段模擬都將根據對應飛行範圍至開放街圖取得目標範圍內的水體後，對水體以 1 m 邊長的網格進行規則切割，得到本次實驗之水面點資訊。模擬之日期設定為西元 2023 年 6 月 5 日，此節將以以上設定進行該日各時段下曙光預估之計算。

本節的模擬成果，將繼續以曙光角 2 度、 3.5 度與光線向量角度差三種曙光判斷成果進行，同時以上成果將分別以「受曙光影響之攝影站數」、「被判斷為曙光之水面點數」兩種統計成果進行討論，前者顯示當航拍專案在該時段下進行飛行後，需要面對及處理的影像數多寡；後者反映整個航拍專案裡，曙光於影像中組成之規模。此類別可以以物空間角度出發，較不易因影像的地面採樣距離有劇烈變化而導致無法對影像間的曙光出現情形進行討論。

3.2.2 不同傾斜角度或航帶方向變動下，曙光出現情形隨時間推移之變化

本小節實驗中，首先嘗試觀察在未進行任何外方位元素調整，即航線設定為東西向、垂直攝影的情況下，隨時間推移所產生的曙光出現情形變化。根據實際計算後的分布，以 15 分鐘為間隔統計後製作為分時統計走勢，完整統計成果如圖 8 所示。

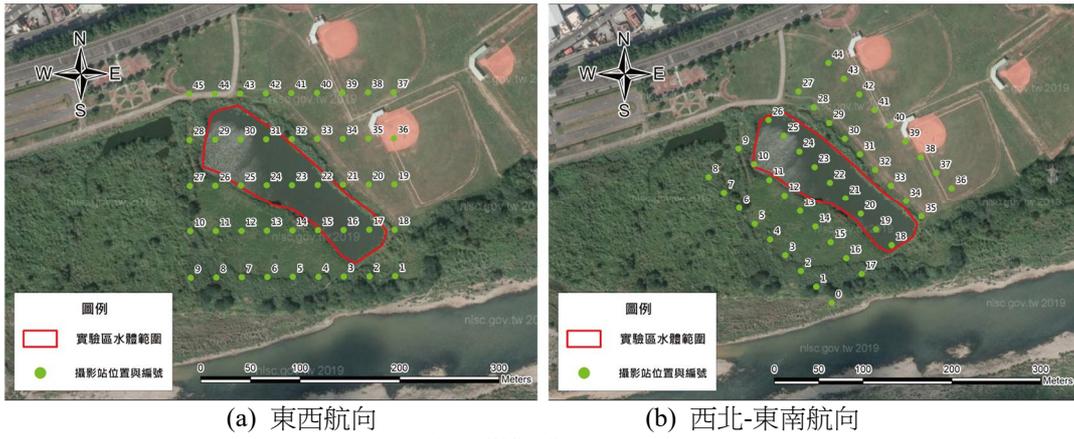


圖 7 模擬設定示意圖

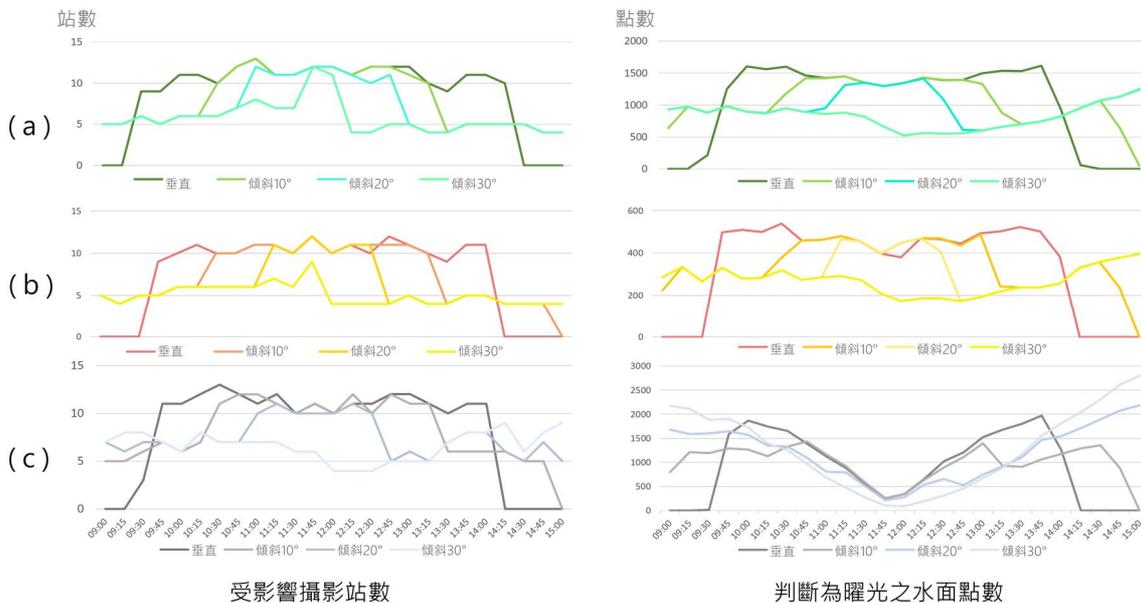


圖 8 東西航帶方向設定下，(a) 曙光角 3.5 度、(b) 曙光角 2 度、(c) 光線向量角度差之判斷成果於不同鏡頭傾斜角度下，受曙光影響攝影站數與被判斷為曙光之水面點數

首先在垂直攝影階段，除 09：15 以前及 14：30 以後的時段下，各曙光預估成果受影響攝影站數會維持一定以上數量。同時，曙光水面點數量除了光線向量角度差的預估成果在 11：30 至 12：15 之間與曙光角預估成果於趨勢上出現較大落差之外，可發現數量出現的高峰時刻並不一定為太陽天頂角最小之時刻，亦顯示在未進行外方位元素調整的階段下，太陽幾何是決定曙光出現的關鍵因素。

當進行傾斜攝影後，各曙光預估成果都在原本未受曙光影響的時段開始受到曙光的影響，但出現較多受影響攝影站的時段隨傾斜角度增加而不斷縮短。直至傾斜 30 度攝影時，除太陽天頂角較小的時段外，其餘時段下受曙光影響的攝影站數量皆有明顯的減少。被判斷為曙光的水面點數成果中，隨

鏡頭傾斜角度增加，曙光角判斷出的數量尖峰時段會由早上及下午的兩個高峰，轉變為僅在中午時刻出現高峰，但需要足夠的傾斜角度才會使水面點數規模有減少趨勢；光線向量角度差的成果顯示其判斷方式會因太陽天頂角大於或小於特定範圍時，判斷出之曙光水面點數會與曙光角成果於趨勢上出現明顯落差。然而當太陽天頂角趨於極大或極小，或進行傾斜攝影時，其所判斷出的兩項統計指標皆有可能出現數量較極端的情形。

以上三種曙光判斷成果，在目前航帶方向設定為東西向的情況下，可歸納出調整鏡頭傾斜角度時需注意數項要點：

- (1) 進行傾斜攝影後，反而會導致航拍專案於更早及更晚時段下的曙光出現情形發生變化，但總體曙

光水面點數量高峰時段會逐漸集中於太陽天頂角較小的正午時段，同時高峰時段下的數量規模有減少的趨勢。

- (2)較小的鏡頭傾斜角度在太陽天頂角小的時段下，判斷成果的減少幅度並不明顯，顯示其無法於該時段有效減少曜光出現情形。
- (3)更大的鏡頭傾斜角度將不利於影像於特定目的上之利用，尚需搭配其他外方位調整方式對曜光進行處理。

實驗亦將對航帶方向的調整進行模擬，觀察此種調整是否可進一步減少曜光於航拍專案中的影響程度。根據航帶方向調整為西北-東南向的模擬成果(圖9)，可發現曜光出現時間在垂直攝影階段便與東西向航帶不同，推測是因航帶與水體平行，使早上時段有較多曜光出現範圍得以落於水體範圍內所致；而曜光出現規模之高峰時段，在垂直及各個傾斜角度下亦與東西向航帶呈現不同趨勢。儘管在進行傾斜攝影後帶來與前段實驗相似的變化，但出現無法以傾斜攝影減少特定時段下曜光出現的情況；而其餘時段為何得以透過鏡頭傾斜改變曜光水面點數規模，亦無法自此成果瞭解原因。

最後，根據 3.1 與 3.2 節中對各曜光判斷成果的討論，可以分別歸納出兩種曜光預估之計算方式在應用上會呈現的特點。曜光角可根據不同閾值設

定，預估出對應大小的曜光範圍，同時在不論垂直或傾斜攝影的情形下，所形成之預估範圍較近似於規則的幾何形狀。但其在不同 GSD 下，需要設定對應的閾值才能有較貼近實際情況的預估成果；光線向量角度差提供相對粗放的曜光預估範圍，且判斷閾值會自動隨曜光於影像中之位置變化，但在傾斜攝影下，其預估範圍會有較大幅度的變動。故目前僅能說明其在垂直攝影下，可一定程度預估曜光範圍，但在傾斜攝影下會有較不穩定的成果。因此，關於 3.2 節統計成果中未能解釋的現象，在下節中將主要以曜光角成果進行整理與解析。

3.3 以曜光水面點討論不同條件下曜光規模之變化

因統計成果無法解釋不同計算成果下曜光規模消長的原因，亦無法討論個別航帶或攝影站在不同傾斜角度、不同航向設定下的曜光變化。因此本節將主要以曜光角 3.5 度之判斷成果，搭配光線向量角度差成果進行處理，將以上成果判斷出的曜光水面點，根據統計成果中未解的現象，以點形式 Shapefile 或透過 Point to Raster 工具製作而成之圖層，整理出曜光對應於實體空間上的變化，對不同條件下的曜光模擬成果中所出現的變動情形進行解釋與討論。



圖 9 西北-東南航帶方向設定下，(a) 曜光角 3.5 度、(b) 曜光角 2 度、(c) 光線向量角度差之判斷成果於不同鏡頭傾斜角度下，受曜光影響攝影站數與被判斷為曜光之水面點數

首先關於光線向量角度差的判斷成果在數量上會隨時間有較大差異，詳細觀察可參考圖 10。透過第 24 號攝影站於 10：45 所呈現的水面點判斷成果，可以瞭解在單一攝影站下當符合「耀光於影像中出現範圍趨近影像邊緣」條件出現時，即當太陽天頂角越大，通過天頂角判斷之水面點所形成之圓形範圍越大、越靠近影像邊緣，通過判斷的基數相對較多，導致所判斷出之耀光水面點數會因目前建立之迴歸關係而產生較多判斷成果；同時，當耀光於影像中愈趨近於像主點時，亦會則使判斷出之耀光水面點數較少。

而在同樣時間下，當航帶方向調整後耀光預估成果有何種改變，可以參考圖 11 進行討論。圖 11 中三角形圖徵代表有出現耀光的攝影站，且不同航帶下的攝影站將以不同顏色進行區分。根據此圖可觀察到東西向航帶於 09：30 時耀光出現範圍還未完全出現在成像範圍內；而西北東南向航帶在同樣時段下，已有完整耀光出現在數個攝影站中。故可透過此階段成果，得知調整的航帶方向與水體長軸、太陽幾何在目標時段下達成特定關係時，亦可能會使航拍專案更早或更持續的受到耀光的影響。

另外，圖 12 中亦說明在西北-東南航向設定下，進行傾斜攝影後耀光預估成果會有何種變化。在垂直攝影成果中，09：30 的攝影成果於西北向與東南向航帶的攝影站裡皆有出現耀光。當進行傾斜 30 度攝影時，西北向航帶攝影站有因為傾斜而避開耀光出現範圍；但東南向航帶上的攝影站都持續受到耀光影響，並皆以完整形狀出現在此航帶之攝影站中，並可由第 12 號攝影站觀察到耀光出現範圍仍與成像範圍邊界有些許距離。本圖成果可得知航帶與水體平行時，會於特定時段，隨設定之影像前後重疊率產生對應數量的耀光影像，且由於攝影站與太陽位置所形成的幾何關係，造成需以更大的鏡頭傾斜角度才能達成避開耀光的目標。此部分亦顯示統計成果中，此航帶設定下早上 9 點前後的時段下為何無法透過目前傾斜角度而為耀光水面點數帶來減少的原因。

最後，本研究亦挑選蒐集耀光影像的航拍專案中，耀光影響較為嚴重的兩條航帶進行模擬，透過

耀光預估之計算驗證該時段下此兩條航帶耀光規模嚴重的原因，並探討若在同一航線規劃與日期條件下，透過現有手段調整是否可以減少航拍專案的耀光影響程度。在此次計算終將搭配以 2 m 網格邊長對進行水體規則切割而得水面點，計算自 09：00 開始至 15：00 為止每 15 分鐘為間隔的各時段耀光出現情形。該兩航帶下的各攝影站原始拍攝時間介於 10：14 至 10：16 之間。最後以耀光角 3.5 度判斷成果，根據各點耀光角角度值，以 GIS 軟體中 Point to Raster 工具製作為 Raster 形式圖層，搭配以有無受影響進行的顯示攝影站圖層，以瞭解有受耀光影響之攝影站中，其耀光出現位置是對應在實體空間中的何處。

根據計算後的統計成果與不同時段之 Point to Raster 工具製作而成的模擬成果 (圖 13)，可以在圖 13(b) 發現兩航帶在原始拍攝時段下的耀光出現範圍皆較為完整、規模較其他時段大，同時在圖 13(c)、圖 13(d) 等其他時段下，亦會因攝影站與水體分布之關係、耀光出現範圍是否落在較完整之水體範圍等因素，而在耀光規模出現不同成果，因此若是以減少該次耀光航拍專案中耀光出現面積為主要處理方向，確實可以透過時間的推移，將攝影時段推遲至 11：45，或甚是 13：15 以後的時段來達成上述目的，並可參考搭配航帶方向上的調整，以改變耀光出現之情形。

根據點形式 Shapefile 或 Raster 形式圖層的成果，得以說明在各式條件下的耀光模擬成果改變的原因。並可藉此瞭解不同調整方式可依循何種原則才能有效為耀光出現情形帶來改善。傾斜攝影於目前 S 型交叉航帶設定下，不論何種航帶方向設定皆會導致整體航拍專案於更早或更晚的時段受到耀光影響。若欲進一步避免耀光出現，本研究建議可嘗試將航帶方向與鏡頭傾斜方向分別設為統一方向，或許能更大程度的透過鏡頭傾斜的方式避免耀光範圍出現在成像範圍。而航帶的走向亦應避免與水體長軸方向平行，否則會因影像重疊率所造成的攝影站數，提高耀光於航帶中影響情形，並可能於特定時段下在平行於水體方向的航帶上會有較多無法避免的耀光出現。

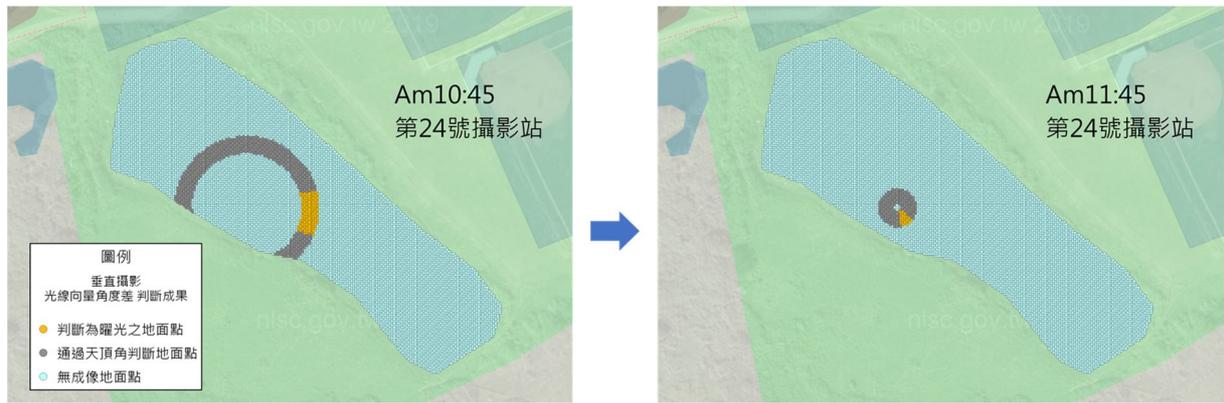


圖 10 光線向量角度差隨時間形成之判斷範圍變化

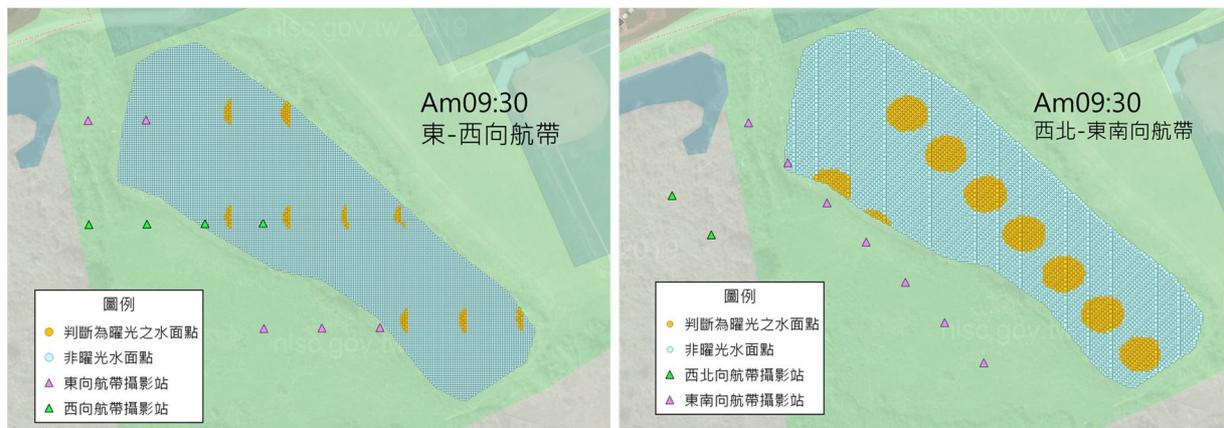


圖 11 耀光角 3.5 度成果中，不同航帶方向設定在同樣時段下之耀光出現情形

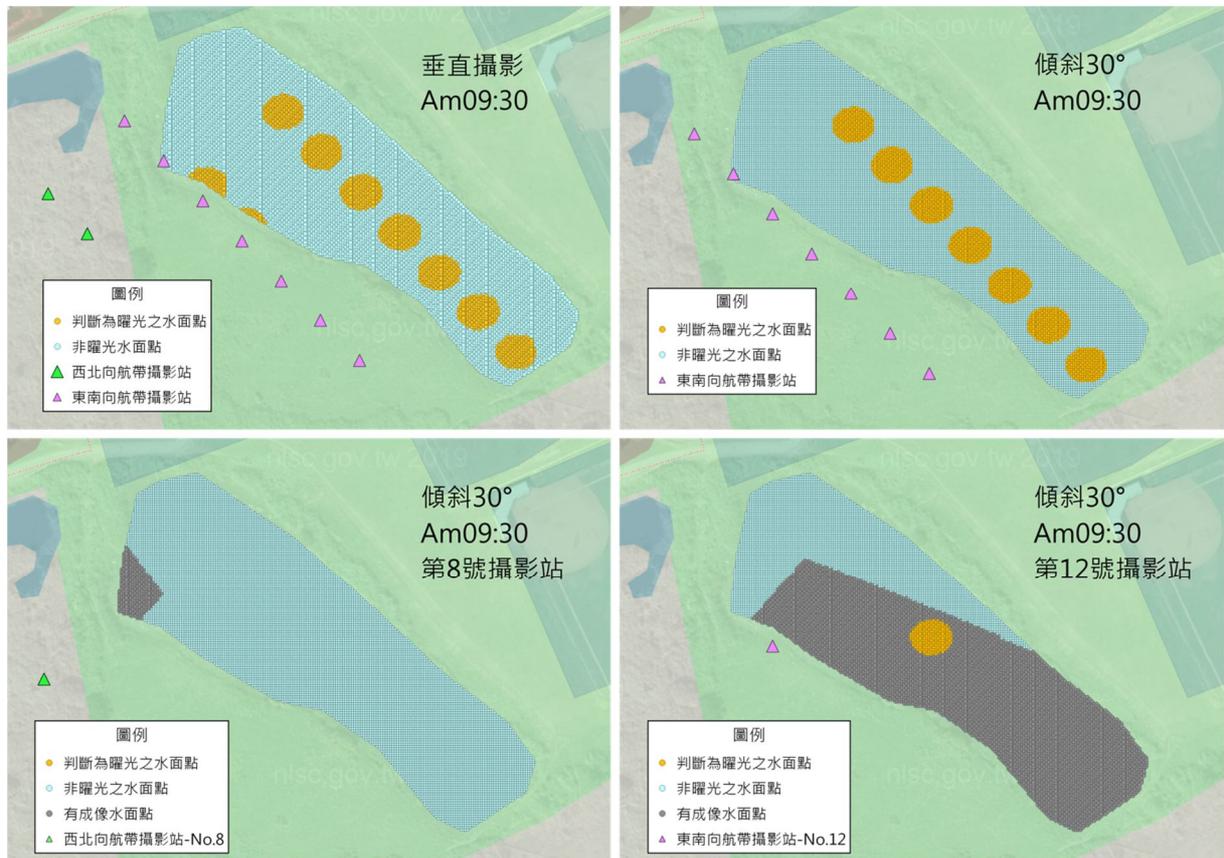


圖 12 耀光角 3.5 度成果中，西北-東南航帶方向下傾斜攝影時耀光判斷成果

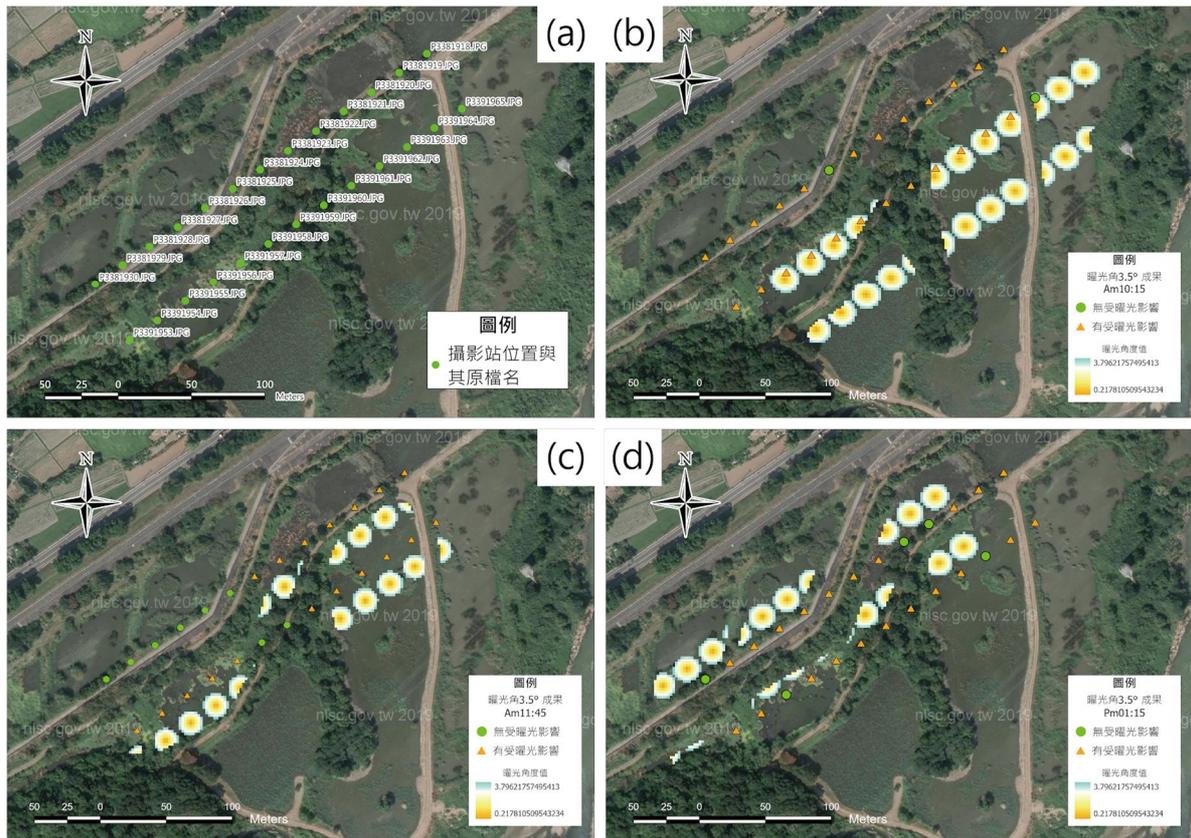


圖 13 (a) 選自耀光實際航拍專案的兩條航帶示意圖，及 (b) 10 : 15、(c) 11 : 45、(d) 13 : 15 下的耀光模擬成果

4. 結論與建議

本研究期望在進行航拍前能以合理的時間事先瞭解耀光出現情形，以避免耀光的出現而導致實際影像中的資訊遭耀光破壞。因此研究中透過耀光預估的計算，根據對應航拍規劃預估耀光出現情形，並提供給僅搭載可見光感測器的無人機使用者作為影像蒐集前的參考資訊。根據研究中耀光預估範圍投影至實際耀光原始影像之成果顯示，耀光預估模式計算出的耀光預估範圍可以協助預估平靜水面下耀光於影像中出現之情形。同時根據相片外方位元素偏移、調整之模擬成果，可以得知在太陽幾何固定的情況下，耀光於影像中的出現位置主要取決於外方位元素，說明耀光出現範圍可透過相片外方位元素之調整進行迴避。

本研究亦透過實驗模擬不同調整方式在不同時間下的耀光出現情形，整理與歸納出時間、傾斜角度與航帶方向在設定上依循的要點。若於東西向航帶設定下進行垂直攝影，可選擇太陽天頂角大的時段進行拍攝以得到最小的耀光影響；當太陽接近

正午、太陽天頂角越小，根據目前實驗的日期與實驗所處之緯度，較難透過合理的鏡頭傾斜角度與航帶方向的搭配來避免耀光出現，同時更大的鏡頭傾斜角度會限制影像於後續可應用之方向，故太陽天頂角較小的時段仍為無人機影像蒐集較不理想的時段。一般 S 型交叉航線的設定下，傾斜攝影必然會使特定航帶在更極端的時段受到耀光影響，需透過非交叉航線之設定才能更好的透過鏡頭傾斜避免耀光的出現。航帶方向的選擇需避免與水體長軸方向平行，才能減少航帶於特定時刻下的耀光出現情形。最後，本研究建立出耀光預估模式之流程可以使使用者可以根據個別航拍專案，依照本研究實驗結果中所整理出之調整原則，搭配模式下的資料獲取方式和耀光預估之計算方式，得知對應情況下，耀光於航拍專案中之出現情形。

未來的研究方向可以嘗試應用過去研究中根據水面波斜率機率分布進行的耀光計算模式，使耀光預估成果可以更符合實際氣象條件所呈現的水面情況。另關於耀光預估範圍漏授、誤授情形之討論，未能搭配影像分割或整理出混淆矩陣等形式進

行討論，應搭配前述更穩健的驗證方式與評估標準進行。同時由於目前是以「被判斷為曜光的水面點數量」此統計類別進行討論，應可將曜光水面點根據其影像坐標計算出各影像中「曜光影響範圍佔影像總體之比例」，較能對曜光範圍在影像中的影響情形進行討論。另外，受限於使用軟體之限制，目前僅能嘗試傾斜攝影的外方位調整方式，無法透過自行編輯航線規劃專案檔，重新讀入現有的航線規劃軟體中。應可自行設計程式將目前計算模式整合航線規劃功能，根據曜光預估成果自動對航線進行調整，根據該調整成果建立為新的航線規劃專案檔後進行飛行，以得到理想之實際影像成果。

參考文獻

- Anggoro, A., Siregar, V.P., and Agus, S.B., 2016. The effect of sunglint on benthic habitats mapping in Pari Island using worldview-2 imagery, *Procedia Environmental Sciences*, 33: 487-495, DOI: 10.1016/j.proenv.2016.03.101.
- Cox, C., and Munk, W., 1954. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter, *Josa*, 44(11): 838-850, DOI: 10.1364/JOSA.44.000838.
- Dhanda, A., Remondino, F., and Santana Quintero, M., 2018. A metadata based approach for analyzing UAV datasets for photogrammetric applications, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42: 297-302, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-297-2018.
- Doukari, M., Batsaris, M., and Topouzelis, K., 2021. UASea: A data acquisition toolbox for improving marine habitat mapping, *Drones*, 5(3): 73, DOI: 10.3390/drones5030073.
- Frulla, L.A., Milovich, J.A., and Gagliardini, D.A., 1995. Illumination and observation geometry for NOAA-AVHRR images, *International Journal of Remote Sensing*, 16(12): 2233-2253, DOI: 10.1080/01431169508954553.
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C.O., and Kaufman, Y.J., 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 87(2-3): 273-282, DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00184-6.
- Giles, A.B., Davies, J.E., Ren, K., and Kelaher, B., 2021. A deep learning algorithm to detect and classify sun glint from high-resolution aerial imagery over shallow marine environments, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 181: 20-26, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.09.004.
- Goodman, J.A., Lee, Z.P., and Ustin, S.L., 2008. Influence of atmospheric and sea-surface corrections on retrieval of bottom depth and reflectance using a semi-analytical model: A case study in Kaneohe Bay, Hawaii, *Applied Optics*, 47(28): F1-F11, DOI: 10.1364/AO.47.0000F1.
- Harmel, T., Chami, M., Tormos, T., Reynaud, N., and Danis, P.-A., 2018. Sun glint correction of the Multi-Spectral Instrument (MSI)-SENTINEL-2 imagery over inland and sea waters from SWIR bands, *Remote Sensing of Environment*, 204: 308-321, DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.022.
- Hochberg, E.J., Andréfouët, S., and Tyler, M.R., 2003. Sea surface correction of high spatial resolution Ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7): 1724-1729, DOI: 10.1109/TGRS.2003.815408.
- Hodgson, A., Kelly, N., and Peel, D., 2013. Unmanned aerial vehicles (UAVs) for surveying marine fauna: A dugong case study, *PloS One*, 8(11): e79556, DOI: 10.1371/journal.pone.0079556.
- Hossain, M.S., Bujang, J.S., Zakaria, M.H., and Hashim, M., 2015. The application of remote sensing to seagrass ecosystems: An overview and future research prospects, *International Journal of Remote Sensing*, 36(1): 61-114, DOI:

- 10.1080/01431161.2014.990649.
- Kay, S., Hedley, J.D., and Lavender, S., 2009. Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes: A review of methods for visible and near-infrared wavelengths, *Remote Sensing*, 1(4): 697-730, DOI: 10.3390/rs1040697.
- Lyzenga, D.R., Malinas, N.P., and Tanis, F.J., 2006. Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8): 2251-2259, DOI: 10.1109/TGRS.2006.872909.
- Mailhe, L.M., Schiff, C., and Stadler, J.H., 2004. Calipso's mission design: Sun-glint avoidance strategies, *AAS/AIAA Space Flight Mechanics Conference*, No.AAS-04-114.
- Manconi, A., Ziegler, M., Blöchliger, T., and Wolter, A., 2019. Technical note: Optimization of unmanned aerial vehicles flight planning in steep terrains, *International Journal of Remote Sensing*, 40(7): 2483-2492, DOI: 10.1080/01431161.2019.1573334.
- Mermelstein, M.D., Shettle, E.P., Takken, E.H., and Priest, R.G., 1994. Infrared radiance and solar glint at the ocean-sky horizon, *Applied Optics*, 33(25): 6022-6034, DOI: 10.1364/AO.33.006022.
- Monzon, C., Forester, D.W., Burkhart, R., and Bellemare, J., 2006. Rough ocean surface and sunglint region characteristics, *Applied Optics*, 45(27): 7089-7096, DOI: 10.1364/AO.45.007089.
- Muslim, A.M., Chong, W.S., Safuan, C.D.M., Khalil, I., and Hossain, M.S., 2019. Coral reef mapping of UAV: A comparison of sun glint correction methods, *Remote Sensing*, 11(20): 2422, DOI: 10.3390/rs11202422.
- Ottaviani, M., Stamnes, K., Koskulics, J., Eide, H., Long, S.R., Su, W., and Wiscombe, W., 2008. Light reflection from water waves: Suitable setup for a polarimetric investigation under controlled laboratory conditions, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(5): 715-728, DOI: 10.1175/2007JTECHA1049.1.
- Overstreet, B.T., and Legleiter, C.J., 2017. Removing sun glint from optical remote sensing images of shallow rivers, *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(2): 318-333, DOI: 10.1002/esp.4063.
- Papadopoulou, E.-E., Vasilakos, C., Zouros, N., and Soulakellis, N., 2021. DEM-based UAV flight planning for 3D mapping of geosites: The case of olympus tectonic window, Lesvos, Greece, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(8): 535, DOI: 10.3390/ijgi10080535.
- Shaw, J.A., and Churnside, J.H., 1997. Scanning-laser glint measurements of sea-surface slope statistics, *Applied Optics*, 36(18): 4202-4213, DOI: 10.1364/AO.36.004202.
- Stow, D., Nichol, C.J., Wade, T., Assmann, J.J., Simpson, G., and Helfter, C., 2019. Illumination geometry and flying height influence surface reflectance and NDVI derived from multispectral UAS imagery, *Drones*, 3(3): 55, DOI: 10.3390/drones3030055.
- Wang, M., and Bailey, S.W., 2001. Correction of sun glint contamination on the SeaWiFS ocean and atmosphere products, *Applied Optics*, 40(27): 4790-4798, DOI: 10.1364/AO.40.004790.
- Windle, A.E., and Silsbe, G.M., 2021. Evaluation of unoccupied aircraft system (UAS) remote sensing reflectance retrievals for water quality monitoring in coastal waters, *Frontiers in Environmental Science*, 9: 674247, DOI: 10.3389/fenvs.2021.674247.
- Zhang, H., and Wang, M., 2010. Evaluation of sun glint models using MODIS measurements, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 111(3): 492-506, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2009.10.001.

Establishing Sun-glint Estimation Model for Unnamed Aerial System Image through Photogrammetry

Chi-Jui Li ¹ Sento Wang ^{2*}

Abstract

Nowadays, Unmanned Aerial System (UAS) imagery products also suffer from blurring and degradation caused by sun glint effects. Various techniques, including detection methods and specialized algorithms, are used to minimize sun glint's impact in aerial or remote sensing imagery. However, it remains uncertain whether the processing techniques used for low spatial resolution images can effectively be applied to images with high spatial resolution.

By establishing the spatial relationships between the ground, sun, and sensor, a threshold for determining the presence of sun glint was established based on previously captured images, specifically for this research model. The findings of the results are presented from statistical, image-based, and physical spatial perspectives to identify the time period with the least sun glint during the target flight. This finding helps in reducing the effort required for sun glint removal. The key outcome of this approach is that employing photogrammetric techniques to establish a sun glint prediction model allows users to understand the distribution of sun glint throughout the entire image acquisition process during the planning phase. By adjusting the timing, it becomes feasible to plan flight schedules during periods of the day that offer higher efficiency in capturing useful images.

Keywords: Sun Glint, Unnamed Aerial System, Photogrammetry, Flight Planning

¹ Master, Department of Geography, National Taiwan Normal University

² Associate Professor, Department of Geography, National Taiwan Normal University

* Corresponding Author, E-mail: sendo@ntnu.edu.tw

Received Date: Jan. 17, 2024

Revised Date: Feb. 19, 2024

Accepted Date: Mar. 13, 2024