

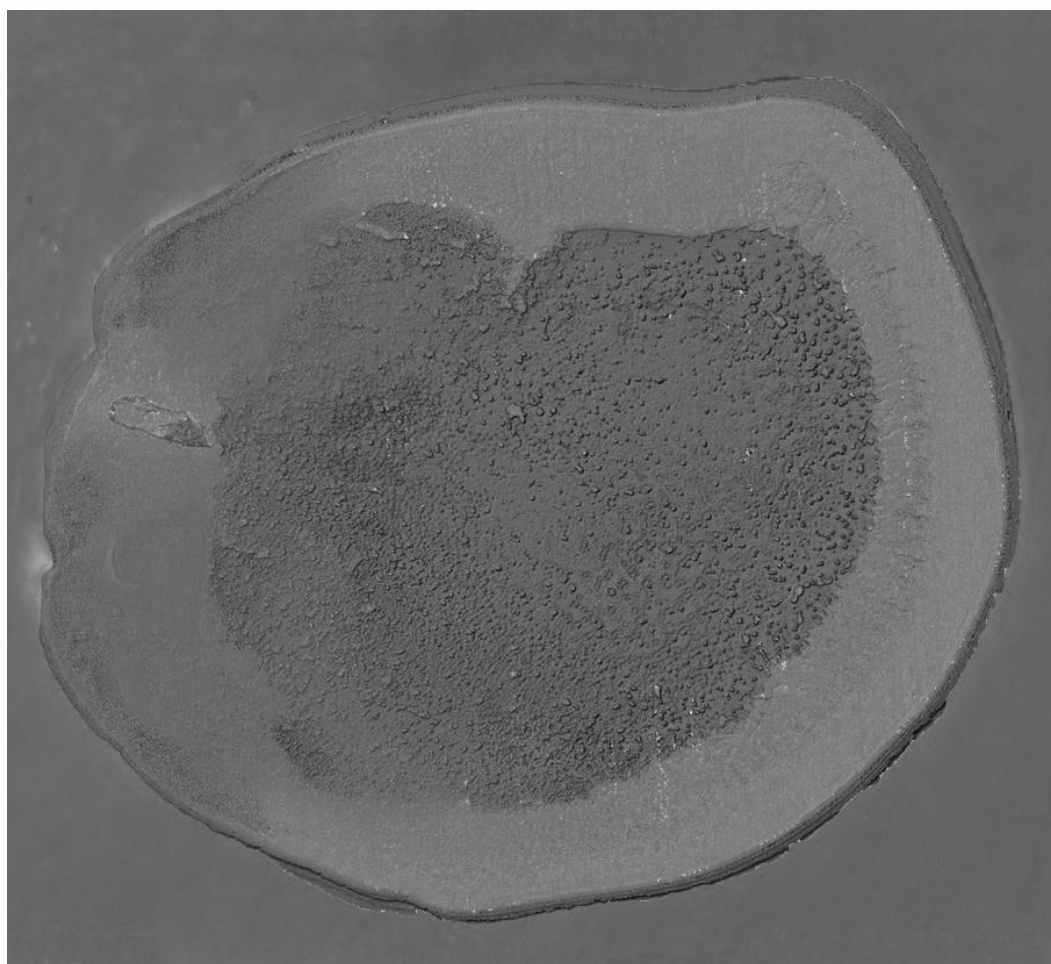
第十六卷第三期
中華民國一〇一年八月

ISSN 1021-8661



航測及遙測學刊

中華民國航空測量及遙感探測學會出版



Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

Volume 16 No.3

August

2012

Published by Chinese Society of Photogrammetry and Remote Sensing

航測及遙測學刊

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

發行人：陳良健

出版者：中華民國航空測量及遙感探測學會

地址：台北市文山區羅斯福路五段 113 號三樓

信箱：台北市郵政 93-158 號信箱

電話：886-2-8663-3468 886-2-8663-3469

傳真：886-2-2931-7225

電子信件：csprsmail@csprs.org.tw

網址：http://www.csprs.org.tw

總編輯

曾義星

國立成功大學測量及空間資訊學系

電話：886-6-275-7575 分機 63835

傳真：886-6-237-5764

電子信件：jprssubmit@conf.ncku.edu.tw

編輯委員

◆ 農林

鄭祈全 (文化大學)

申雍 (中興大學)

◆ 海洋與大氣

劉振榮 (中央大學)

何宗儒 (台灣海洋大學)

◆ 防災

劉進金 (達雲科技有限公司)

徐百輝 (台灣大學)

◆ 土地利用與覆蓋

陳永寬 (銘傳大學)

詹進發 (政治大學)

◆ 地理資訊系統

何維信 (中華科技大學)

蔡榮得 (中興大學)

◆ 遙感探測

陳良健 (中央大學)

陳錕山 (中央大學)

◆ 攝影測量與光達

廖揚清 (成功大學)

史天元 (交通大學)

趙鍵哲 (台灣大學)

PUBLISHER: L. C. Chen

PUBLISHED BY: Chinese Society of Photogrammetry and Remote Sensing

Address: 3F, No.113, Sec.5, Roosevelt Road, Taipei, Taiwan

Mail Address: P. O. Box. 93-158, Taipei, Taiwan

Tel: 886-2-8663-3468 886-2-8663-3469

Fax: 886-2-2931-7225

E-mail: csprsmail@csprs.org.tw

Web Site: http://www.csprs.org.tw

EDITOR-IN-CHIEF

Yi-Hsing Tseng

Department of Geomatics, National Cheng Kung University

Tel: 886-6-275-7575 ext. 63835

Fax: 886-6-237-5764

E-Mail: jprssubmit@conf.ncku.edu.tw

EDITORIAL BOARD

◆ Agriculture and Forestry

C. C. Cheng (Chinese Culture University)

Y. Shen (National Chung Hsing University)

◆ Oceanography and Atmospheric Science

G. R. Liu (National Central University)

C. R. Ho (National Taiwan Ocean University)

◆ Disaster Management

J. K. Liu (LIDAR Technology Co., Ltd)

P. H. Hsu (National Taiwan University)

◆ Land Cover and Land Use

Y. K. Chen (Ming Chuan University)

J. F. Jan (National ChengChi University)

◆ Geographical Information System

W. H. Ho (China University of Science and Technology)

J. D. Tsai (National Chung Hsing University)

◆ Remote Sensing

L. C. Chen (National Central University)

K. S. Chen (National Central University)

◆ Photogrammetry and LiDAR

Y. C. Liao (National Cheng Kung University)

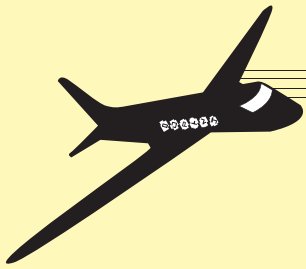
T. Y. Shih (National Chiao Tung University)

J. J. Jaw (National Taiwan University)

封面圖片說明 About the Cover

本圖所示為民國九十九年九月間以空載測深光達施測所得之東沙環礁地形，高程系統為橢球高，背景影像為福衛二號所攝之多光譜影像。東沙環礁位於南海，距高雄約 450 公里，是我國第一座海洋國家公園。

(封面圖片出處：澎湖與東沙環礁測深光達作業探討，第十六卷 第三期 第 151-166 頁)



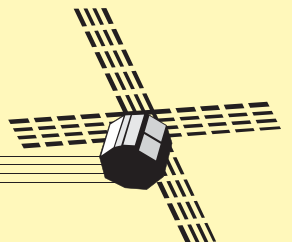
特刊引言 測深光達原理與應用

史天元
國立交通大學土木工程系

測深光達為以雷射掃描進行水域地形測量之作業技術，具有全波形記錄、多頻道掃描之特性。臺灣地區首度引進空載測深光達，為民國93年12月至94年10月間執行之內政部土地測量局(今國土測繪中心)「潮間帶地形測繪先導計畫」。該計畫之施測區域為「北自大肚溪出海口南岸端，南至員林大排出海口北岸端，東至南北端間海堤堤面中線為原則之連線往東200公尺止，西至當地最低潮位線起算至水深5公尺處」。此外，亦在北起通霄海岸，南至外傘頂洲海岸區域以測深光達施測。均因水質混濁，使得無水底反射之雷射回波值。為測試測深光達效能，另選擇宜蘭東澳及花蓮港地區進行測試。宜蘭東澳區域由於航線跨越山嶺高度達500公尺以上，而航高規劃僅400公尺，利用BN-2B定翼機因迴轉半徑較大故無法近岸施測，因此只能進行一條離岸邊較遠之航線，測得最深深度28公尺。花蓮港測區共計執行22條航線，測得最深深度37公尺，本區共進行兩組掃描參數之施測，包括航高300公尺、點雲密度3 x 3公尺及航高400公尺、點雲密度5 x 5公尺等兩組資料，進行航線間比對，比對成果符合25公分高程精度成果。

第二次引進為民國九十五至九十七年間，內政部「應用透水光達技術於近岸海域測繪工作案」，本特刊中王驥魁教授等所撰述者即為根據該案之成果。第三次引進為民國九十七年十二月至一百年四月間，內政部「以透水光達測繪技術測製東沙地區數值模型工作」計劃案，本特刊中有三篇論文即與此計畫相關。該計畫除順利完成東沙環礁約五百平方公里水域與澎湖測試地區之測繪外，亦曾就內陸水體如曾文水庫、南化水庫、與數段河道進行作業評估。但是內陸水體，在平原區有水質透光度不足之問題，在上游河段與水庫區，除優氧化造成之水濁問題外，飛行安全之顧慮亦為無法進行之主因。

綜合目前已有經驗，空載測深光達確實已達到實際應用階段。在淺水多礁、航行不便之處，空載測深光達是測繪水下地形唯一務實方案。以東沙環礁作業為例，航空測量具有快速、高效率之特色。但是，作業環境，尤其是水質之透光度，影響甚大。同時由於飛行時對地航高為300至400公尺，地形與人工建物如高壓電塔、跨河電纜、等，對飛安影響之顧慮，以及低空飛行時飛行器產生之噪音對居民生活品質之危害，均對空載測深光達之作業形成限制。另一方面，近三年中，有多種新型之機具開發成功，包含提升濁水穿透能力、提升測繪精度之機具，以及以10公尺以內水深作業為標的之「輕型」機具。未來儀器功能與價格，均將更具實用價值。因此，如何妥善引用空載測深光達技術，擬定針對極富開發價值之近岸淺水區測繪之策略，是當前面對之課題之一。



澎湖與東沙環礁測深光達作業探討

史天元^{1*} 薛憲文² 蕭輔導³ 陳雅信⁴ 徐佳筠⁵ 陳杰宗⁶ 陳佳勳⁷

摘要

空載測深光達(Bathymetric Lidar, 或稱透水光達), 以航空器為載具, 載運雷射掃瞄儀, 進行水域水底地形測量之系統。掃瞄儀所使用之雷射光, 為具穿透水體能力之綠光波段。

為引進空載測深光達作業技術, 並獲取東沙環礁之水底地形資料, 內政部於民國九十七年規劃澎湖及東沙環礁地區測量專案, 並委由交通大學執行。本次測量採用 AHAB HawkEye II 系統, 以 Swearingen SA-226T 航空器為載具, 於民國 99 年 8 至 9 月間進行。實際完成東沙環礁約 500 平方公里, 澎湖地區逾 400 平方公里之飛行測量。測量點間距(Nominal Point Space, NPS)約為 3.5 公尺。並擇定環礁東部約 20 平方公里區域, 以較低航高獲取點間距 2 公尺之點雲。載資料品質管控工作上除了進行交叉航線及重疊航線之檢核外, 並以船載聲納作業進行外部精度檢核, 所獲取資料精度皆達國際海道測量組織(International Hydrographic Organization, IHO) 規範之一等要求。本文依據本計畫之作業經驗, 整理描述飛航過程、資料編修處理、精度驗證、及產製成果等階段工作, 並分析各階段之重要關鍵, 期為未來相關工作之參考。

關鍵詞：全波形、航空測量

1. 前言

船載單音束(Single Beam)或多音束(Multi-Beam)之聲波測深(Sonar)技術, 為目前水深測繪工作之主要作業方式。此一方式為使用水面載具, 而近岸水底地形不明處常藏有暗礁, 船隻航行探測存有高風險。空載測深光達(Airborne Bathymetric Lidar)主要適用範圍, 為深度約 30 公尺範圍內之清澈水域。相較於船載聲納測深技術(目前主要的測深方式), 其優勢在於作業速度較快, 且於近岸水淺與礁石區等船行不便處, 作業安全性較高。「透水光達」, 又稱「測深光達」, 前者有具體說明其功能特殊處之優點, 後者為其英文名稱之直譯, 以下統稱為測深光達。

本文針對東沙環礁及澎湖群島兩個作業區, 利

用空載測深光達測繪技術, 取得近岸水深資料, 建置數值地形模型。東沙環礁是我國第一座海洋國家公園(內政部於民國 96 年 1 月 17 日正式公告), 位於南海北部海域, 距高雄約 450 公里, 與台灣本島之地理相對位置如圖 1 所示。東沙環礁為一直徑約 25 公里的圓形環礁, 礁台長約 46 公里, 寬約 2 公里, 如圖 2 所示。東沙島位於環礁西側, 呈蟹鉗狀, 古有「月牙島」之美稱, 為環礁中唯一之島嶼, 最高處海拔約 7.8 公尺, 全島東西長約 2800 公尺, 寬約 865 公尺, 陸域總面積約 1.74 平方公里, 周圍海岸線長約 8 公里(海洋國家管理處, 2010)。東沙環礁為珊瑚礁群, 珊瑚礁有海洋雨林之稱, 極具保育價值。動植物棲地與水下地形相關, 如東沙區域之海草, 其分布即與水深高度相關(李培芬等, 2011)。該區域之測深工作, 不僅可提供海圖製作

¹ 交通大學防災與水環境研究中心 教授

² 中山大學海洋環境及工程學系 副教授

³ 內政部地政司 司長

⁴ 交通大學防災與水環境研究中心 副工程師

⁵ 交通大學防災與水環境研究中心 計畫助理

⁶ 內政部地政司 科長

⁷ 內政部地政司 科員

*通訊作者, 電話: 03-5712121 ext.54940, E-mail: tyshih@mail.nctu.edu.tw

收到日期:民國 100 年 11 月 30 日

修改日期:民國 101 年 02 月 16 日

接受日期:民國 101 年 02 月 25 日

之基本資料，並可支援該區域動植物生態、海洋物理等研究，具體上可協助辦理大陸礁層調查工作、國際海嘯潮位監測、及建立西太平洋海洋保護區區域據點，並於國土規劃、防災、科技、觀光等方面亦有極高之附加價值。

澎湖群島由 90 座島嶼組成，全島面積約 127 平方公里，澎湖縣包含 1 市 5 鄉，包括馬公市、湖西鄉、白沙鄉、西嶼鄉、望安鄉及七美鄉，就地理位置而言，距離高雄約 140 公里，如圖 1 及圖 3 所示。近年因特殊的玄武岩地質景觀，國際地質專家建議爭取列為世界遺產或設置為國家地質公園，為台灣之重要的觀光勝地。

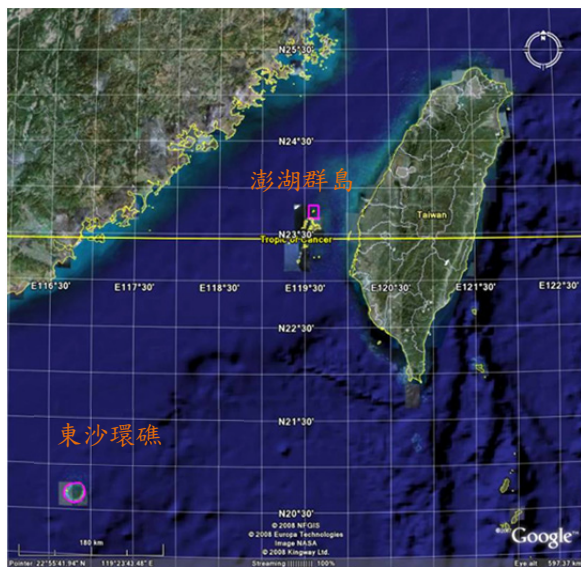


圖 1 台灣本島與東沙及澎湖間地理位置關係

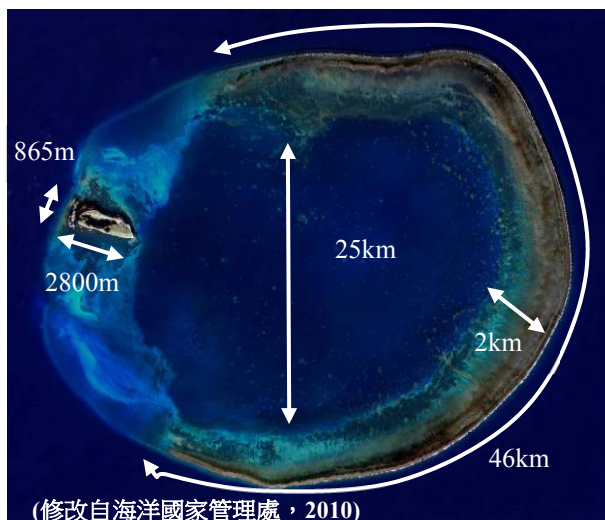


圖 2 東沙環礁衛星影像

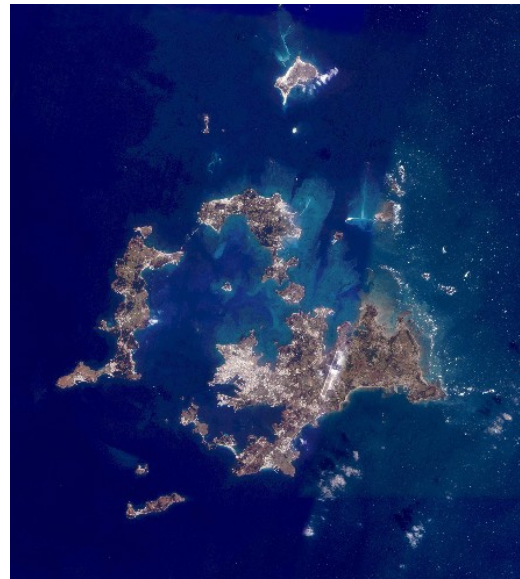


圖 3 澎湖群島衛星影像

2. 測深光達測量作業

空載測深光達雖已達常規作業之成熟階段，但是目前仍為稀有性技術。無論商業性系統或服務提供者，均屈指可數(史天元等，2010)。本節分別就航空器及儀器評估與選擇、所使用之 AHAB HawkEye II 系統簡介、飛航規劃、許可申請及飛航測量作業等作業流程項目說明。

2.1 航空器及儀器評估

空載光達系統依週邊配置不同，整體重量在 120 至 200 公斤之間，加上一至二名操作人員及正副機師，安全重量需達 600 公斤以上，主要之航空器均可符合需求。光達掃描窗可以使用機身現有標準空照窗，並直接固定於機艙上，不需要一般航照相機如 LMK 或 RMK-TOP 之相機機座(Camera Mount)。由於測深光達作業時會產生熱能，飛機需具有良好冷卻系統。載具選擇上，必須考量之事項，包含艙面面積(亦即須有足夠空間安裝儀器並提供操作人員作業空間)、電流供應量、以及可提供之最低航速值等。本案因須至東沙地區作業，故航程亦為一重要考量因素。

國內非客運飛航器與所屬公司如表 1 所示，現有民間相關業務飛行器配合難度較高，而漢翔公司

ASTRA G-100 因巡航速度每小時達 900 公里，航速過高亦無法使用。國內投入航遙測業務者僅空勤總隊 Beechcraft King Air 200 與 Beechcraft King Air 350 符合需求，但因國內其他業務需求高，對原有任務之影響較難掌握。國際上專門出租航空器之公司，如日本共立航空攝影株式會社、Dynamic Aviation Corp.等，可提供 Beechcraft King Air BE-90/100/200 等同級機種，且已具備航遙測系統安裝記錄，可於本研究內租用。

民國 97 年度全球商業性服務提供者共有三家，分別為 BLOM、Fugro 及 Tenix-LADS。98 年 6 月時，Tenix-LADS 為 Fugro 併購，但英國新增一家 Pelydryn，於 98 年 9 月開始商業運作。上述四家服務提供商搭配使用之航空器如表 2 所示。

Pelydryn 公司之經營策略為提供數據蒐集，美洲與亞太地區業務與加拿大 Geomatics Data Solutions 公司合作，由 Geomatics Data Solutions 公司提供數據處理與分析，並負責對外議約，本案於民國 99 年 8 月開始進行攝影測量作業。

經過評估，就儀器而言，AHAB HawkEye II 為當時較新之測深光達系統，Fugro 的 Optech SHOALS (Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey) 及 Fugro LADS (Laser Airborne Depth Sounder)其服務品質及實務經驗均優。在綜合考量包含工作時程、技術轉移等各種因素之後，本團隊決定採用 Geomatics Data Solutions 與 Pelydryn 組合之 HawkEye II 系統，而 Pelydryn 公司選擇搭配 Swearingen SA-226T 航空器。

表 1 國內飛航器所屬公司

單位名稱	載具	翼型	發動機數	滯空/航程(概估)
大鵬航空公司	BN-2B	定翼	雙發動機	滯空3.5小時 最大航程740公里
群鷹翔航空公司	BN-2A	定翼	雙發動機	滯空4小時 最大航程800公里
群鷹翔航空公司	BN-2B (具有機翼副油箱)	定翼	雙發動機	滯空8小時 最大航程1600公里
德安航空公司	BK-117	旋翼	雙發動機	滯空2.0小時 最大航程500公里
凌天航空公司	Bell-206B	旋翼	單發動機	滯空3.2小時 最大航程700公里
空勤總隊-- 農委會林務局 農林航空測量所	BE-200	定翼	雙發動機	滯空4.0小時 最大航程1818公里
	BE-350	定翼	雙發動機	滯空4.0小時 最大航程2772公里
漢翔公司	Astra G-100	定翼	雙發動機	滯空6.0小時 最大航程6000公里

表 2 測深光達服務使用之航空器

公司名稱		光達系統	載具	備註
BLOM Aerofilms Corp.		HawkEye II	Aero Commander 690	
Fugro	LADS	LADS MK II	Bombardier Dash 8	
	Pelagos	SHOALS	Beechcraft King Air A90或200T	視需求搭配
Pelydryn		HawkEye II	Swearingen SA-226T	視需求搭配

2.2 HAWKEYE II 系統簡介

地形測量所使用之空載光達系統多使用紅外波段 1064nm 波長之雷射光，該波段對水體之穿透力低，若經倍頻後所得 532nm 波長之雷射光，則屬綠光波段，具有透水能力 (Guenther, 1985; Guenther, *et al.*, 2000)。

HawkEye II 系統由瑞典的 Airborne Hydrography AB (AHAB) 所製造，結合了地形 (Topographic) 及測深 (Bathymetric) 光達系統，可同時蒐集海域及陸域之數據，系統外觀如圖 4 所示 (Henrick, 2006)。測深雷射波脈衝每秒達 4000 次，地面雷射波脈衝每秒達 64000 次。HawkEye II 發出紅外光及綠光分別用於偵測表面及地底，並設有 4 個感測器系統，分別為紅外頻道、Raman 頻道、淺水綠光水底頻道 (shallow channel) 及深水綠光水底頻道 (deep channel) 接收反射波。早型之 HawkEye II 系統，不使用 Raman 頻道，而為兩個極化之紅外頻道，一個正交 (Orthogonal)，另一個平行 (Parallel)。但是 Pelydryn 公司所有之系統為改良型，故又稱 HawkEye IIb。

HawkEye II 系統採用弧形掃描，如圖 5 所示，雷射光束入射與地面並非垂直，保持一固定入射傾角 (θ) 約 20° ，如此可避免直接垂直入射所產生之強烈鏡面反射。一個綠光雷射足跡 (footprint) 約 2 公尺 x 2 公尺，其中包含 4 個 pixel，此法採用快閃光達 (Flash Lidar) 概念，可提高點雲空間密度。本次搭配 IDE UI-2250SE 數位相機，焦距固定為 12 公厘，每秒拍攝一張影像 (1600*1200 像素)，相機外觀如圖 6 所示。

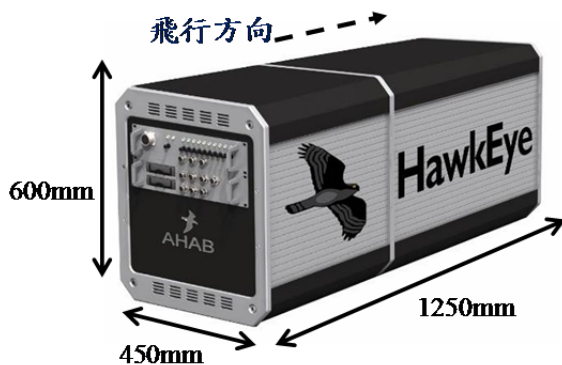


圖 4 HawkEye II 系統外觀

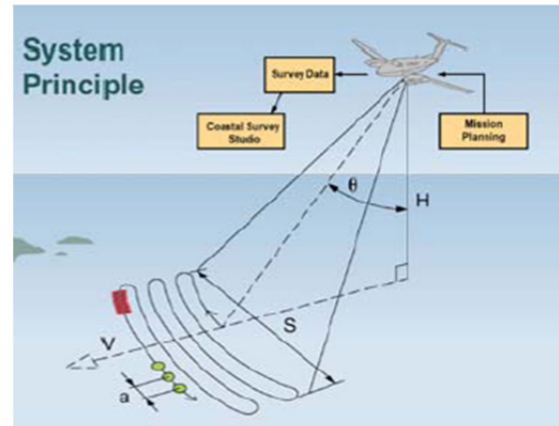


圖 5 HawkEye II 系統掃描方式 (AHAB, 2006)



圖 6 IDE UI-2250SE 數位相機

2.3 飛航申請

交通大學於 99 年 5 月與 Geomatics Data Solutions 及 Pelydryn 簽定合約，進行前期飛航規劃作業，於同年 8 月進行飛航作業，並據以進行後續資料處理。本案所規劃之測區包含約 400 平方公里之澎湖測試區及 500 平方公里之東沙環礁。經分析氣象記錄與現地訪談，歸納適當飛航作業為每年 4 至 6 月。其主要原因為避免季風與颱風之旺季。

使用國外航空器進行航空攝影測量主要需取得以下 3 項許可，包含航空攝影測量許可、載具引進許可、及空域使用許可，取得時間如表 3 所示。由內政部函轉國防部，國防部核復內政部後取得同意，費時約 2 個月，於 99 年 4 月 19 日內政部台內地字第 0990070399 號函取得許可。國外載具引進

許可由本團隊向內政部行文申請，並由內政部函轉交通部，交通部轉至民航局，民航局會簽各單位意見，同意後轉呈交通部核復內政部，於 99 年 8 月 2 日交航字第 0990044713 號函同意載具引進許可。空域使用許可則委由德安航空公司向交通部民用航空局申請，99 年 8 月 12 日空運管字第 0990024355 號函同意於同年 8 月 18 日至 9 月 29 日之空域使用權。

國際航空器申請來台作業許可部分，交通大學委託中華航空公司代理。國內航空代理及地勤支援則由德安航空公司負責，除協助運輸油料至東沙島及飛行器停靠機場時之固定及維修等事宜外，並協調作業時航道安排與許可。

表 3 本研究取得許可及花費時間

名稱	取得許可時間	核准單位	花費時間
航空攝影測量許可	99.04.19	內政部	約2個月
國外載具引進許可	99.08.02	交通部	約2週
空域使用許可	99.08.12	交通部民用航空局	約2週

2.4 飛航規劃

本研究測量區域包含澎湖及東沙地區，先於澎湖地區進行試飛及率定測量後，預計飛航測量面積約 400 平方公里，掃描參數如表 4 所示，航線規劃如圖 7 所示，每航次均由高雄小港機場起降。

表 4 澎湖地區測區規劃參數

項目	澎湖測試區
測點密度	3.5×3.5 公尺
航高	400 公尺
航速	150節
帶寬	160 公尺
側向重疊率	20%
範圍	415 平方公里
總計航線	118條
工作時程 (飛行小時)	19小時 (由馬公機場起降)

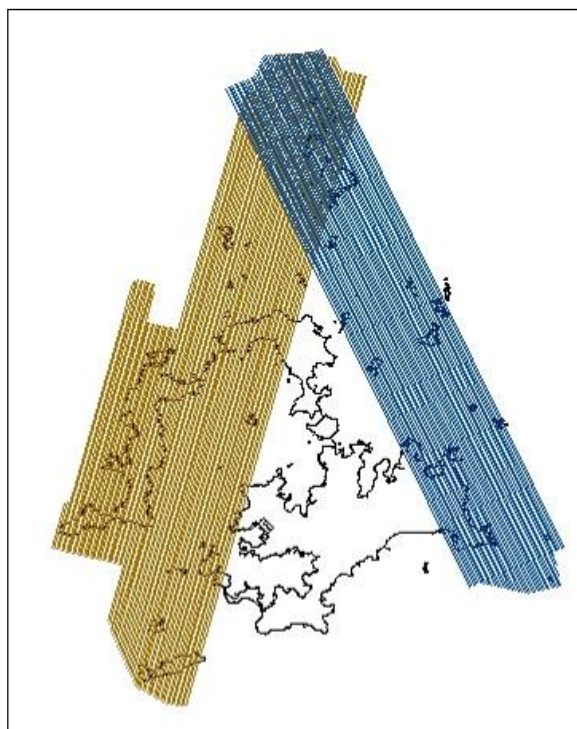


圖 7 澎湖地區規劃航線圖

東沙地區掃描範圍包含整個環礁，面積約 500 平方公里，延伸至水深 50 公尺處或雷射光所能穿透之深度，並於東沙環礁東部進行約 20 平方公里額外測量，測量密點加密為 2 X 2 公尺，掃描參數如表 5 所示，另外測量兩條與航線垂直之檢核線，航線規劃如圖 8 所示，每航次均由東沙機場起降。

表 5 東沙地區測區規劃參

項目	東沙地區	東沙地區 (加密測區)
測點密度	3.5 × 3.5 公尺	2 × 2 公尺
航高	400 公尺	300 公尺
航速	150節	150節
帶寬	160 公尺	120 公尺
範圍	506 平方公里	20 平方公里
總計航線	183條	35條
工作時程 (飛行小時)	22小時 (由東沙機場起降)	6小時 (由東沙機場起降)

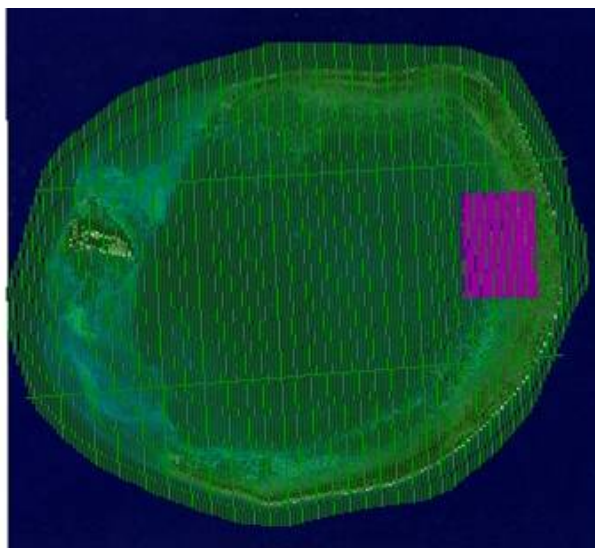


圖 8 東沙地區規劃航線圖

2.5 飛航作業

99 年 8 月 18 日測深光達儀器 HawkEye II 運抵台灣，8 月 19 日載具 SA-226T 飛抵台灣後，立即進行整備及儀器測試，9 月 20 日完成澎湖測量作業，9 月 21 日至 9 月 25 日前往東沙作業，9 月 26 日於澎湖進行最後率定作業後，所有光達資料已建置完成，載具於 10 月 3 日離開台灣，作業時程表如表 6 所示。

扣除維修及天氣等相關等待天數，飛航期間約 2 週，獲取之原始資料量約 1.5TB(Terabyte)。

表 6 作業時程表

日期	作業項目
99.08.18	測深光達儀器HawkEye II 運抵台灣
99.08.19	作業載具SA-226T抵達台灣
99.08.20-09.20	飛機整備、澎湖地區率定 及測量作業
99.09.21-09.26	東沙測量作業
99.10.03	作業載具SA-226T離開台灣

3. 資料處理及精度驗證

本研究飛行作業期間，分別於高雄小港與東沙島設置數據處理場所。現地下載測深光達資料做立即解算，確認資料之覆蓋率及品質，以便決定是否需要重飛、改變規畫等作業。系統操作員依據審查同意之飛航規劃書，執行飛航掃描任務，並須依照品質管制程序，於掃描前、掃描中及掃描後進行必要之硬體檢查、參數確認及完整之工作紀錄。最後數據處理，包含重新解算、編修及驗證等工作，均於交通大學防災與水環境研究中心研究室執行，該研究室遵照資安保全規範，設有全時間監視錄像設備，並對進出人員予以管制。

資料處理分為每日即時解算及後續編修，精度驗證分為內部精度及外部精度，內部精度又分為交叉測線檢核(Cross line check)及相鄰重疊測線檢核(Overlap check)。

各作業項目分述於以下小節。

3.1 系統率定作業

HawkEye II 的率定分兩個部份，大多數的率定參數是在出廠前於實驗室內獲得，這些參數理論上可維持其穩定不變，但有些率定參數，與系統整合及安置於載具時之情況有關，無法在實驗室內完成，必須藉由掃描數據計算獲得，例如軸角等率定參數。在軸角率定參數中，主要是率定因慣性量測系統單元(IMU)中心與雷射掃描系統稜鏡旋轉中心間之安置偏差量，此種參數可能會因較為劇烈的碰撞或是在嚴酷的溫度下而有所改變。由軸角參數所引起的誤差基本上為航高、掃描角、以及飛行方向的函數，本研究採用的 HawkEye II 搭配之導航系統為 Applanix POS/AV 410。

本研究率定場設置於澎湖西嶼地區，率定飛行航線如圖 9 所示，包含陸域與海域兩部份。作業日期為 99 年 9 月 6 日與 99 年 9 月 26 日，分別為航空測量作業之前與航空測量作業完成之後。由於航空測量飛行高度在密度 3.5X3.5 公尺時為 400 公尺，密度 2X2 公尺時為 300 公尺，故每次率定時亦分

別以該兩航高各進行一次。海面上飛行一條航線約 2.2 公里，平坦陸地上飛行面積約 0.5 平方公里。率定參數成果，如表 7 所示。

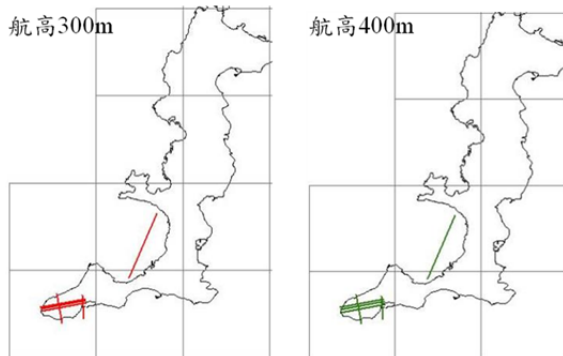


圖 9 率定飛行航線

3.2 飛航軌道參數求解

澎湖地區及東沙地區進行測深光達掃描時，除使用內政部國土測繪中心 e-GPS 衛星追蹤站外，同時另擇適當地點架設 2 個 GPS 基站，以每秒 1 筆之資料接收頻率記錄 GPS 訊號。澎湖地區平面控制點如圖 10 所示，其中 CIME、WIAN、HUSI 及 JIBE 為 e-GPS 衛星追蹤站，4921 及 6407 兩站為自行架設。

東沙地區平面控制點如圖 11 所示，東沙地區已有衛星追蹤站 TNSM，作業期間除原設定之每 30 秒 1 筆記錄外(A 檔)，並設定每秒 1 筆 GPS 取

樣頻率為 B 檔。航空測量作業時期，並同時於東沙島另外架設兩台 GPS 接收儀，分別設置於 MNPH-01(由機場塔台出發向北沿跑道行約 200 公尺，再往左前行約 1500 公尺，點位在跑道盡頭處)與 MNPH-08(漁民服務站樓頂水塔上)，取樣頻率每秒 1 筆，以為備份。

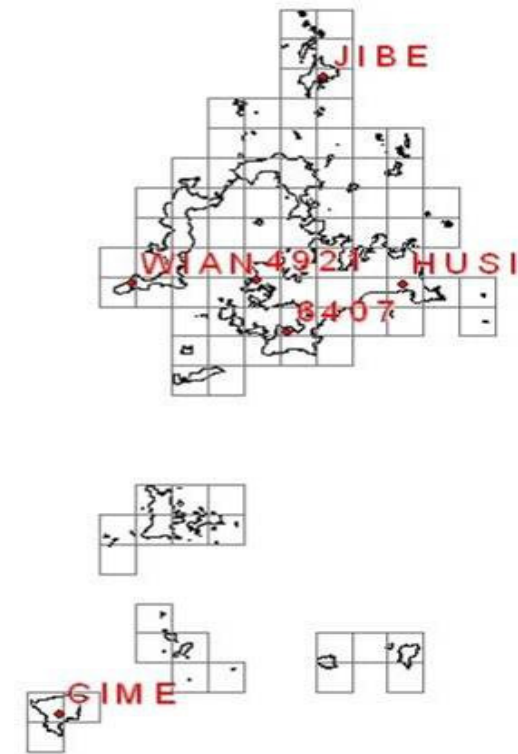


圖 10 澎湖地區平面控制點分布圖

表 7 率定參數表

		Preliminary Calibration Parameters (deg.)	Final Calibration Parameters (deg.)
IMU Angle Corrections	Roll	0.059	0.060
	Heading	-0.125	-0.129
	Pitch	0.0198	0.020
Scanner Angle Corrections	Delta X Angle	0.166	0.151
	Delta Y Angle	0.750	0.735
Boresight Angle Corrections	Delta Theta Hydro	-0.384	-0.327
	Delta Phi Hydro	0.103	0.132
	Delta Theta Topo	-0.196	-0.198
	Delta Phi Topo	0.139	0.144
Cage Angle correction		0.230	0.236



圖 11 東沙地區平面控制點分布圖

資料後處理首先整合地面 GPS 基站資料、飛航載台 GPS 資料及 IMU 慣性導航資料，使用 POSPac MMS 5 軟體進行 GPS 動態差分解算，並逐步求解每一條掃描航線之最佳掃描軌道之瞬時三維坐標與姿態方位參數，經 POSPac 解算之航跡，可結合雷射掃描資訊，使用 AHAB Coastal Survey Studio (CSS)軟體初步產製單一航帶之掃描成果，解算流程如圖 12 所示(Isaksson, 2009)。

澎湖測量期間因遭遇萊羅克(Lionrock, 8 月 31 日)及莫蘭蒂(Meranti, 9 月 9 日)颱風導致水質較平常混濁，實際作業時間共 5 日，共計 139 條航線。東沙地區採用南北航向，以避開強烈的陽光反射(Sun glint)，99 年 9 月 22 日至 9 月 25 日每日上午及下午各飛行一個航次。9 月 24 日至 9 月 25 日另外飛行補足資料缺漏區，並於 9 月 24 日進行 2x2 公尺密度額外測量，共計 267 條航線。

3.3 測深光達點雲編修

本研究使用 Airborne Hydrography AB 公司 Coastal Survey Studio (CSS)軟體進行後處理，由紀錄之全波形(Full Waveform)計算出水深值，並將 POS 數據、率定數據及相關光達掃描數據輸入後，分別產出各條航帶之點雲資料，流程如圖 13 所示。經初步產出之點雲仍包含雜訊，須經過人工之編修與處理，以產出最終之海底數值地形成果。

點雲資料透過 Geomatic Data Solutions 公司之

GreenC 軟體轉檔為 PFM 格式後，使用 Fledermaus 軟體進行編修，編輯模式如圖 14 所示，可清楚看出被剔除之雜訊，並可使用 GreenC HawkEye viewer 輔助，同步顯示全波形及拍攝之數位相片等相關資訊，如圖 15 所示。

3.4 測深光達點雲精度分析

精度分析主要使用 Fledermaus 中的 Crosscheck 模組，以點對面之方式比較檢核線與其他組成面同一位置之高程差異，以進行所得測深資料之品質檢核，包含航線間重疊處(overlap)及交叉航線(cross line)，所得成果符合 IHO (International Hydrographic Organization) Order 1b 之規範。

澎湖地區及東沙地區分別於 99 年 9 月 16 日及 9 月 24 日進行交叉航線飛行，澎湖地區一條檢核線，東沙地區兩條檢核線皆與正常飛行航線角度交角在 60 度至 90 度之間，如圖 16 所示。

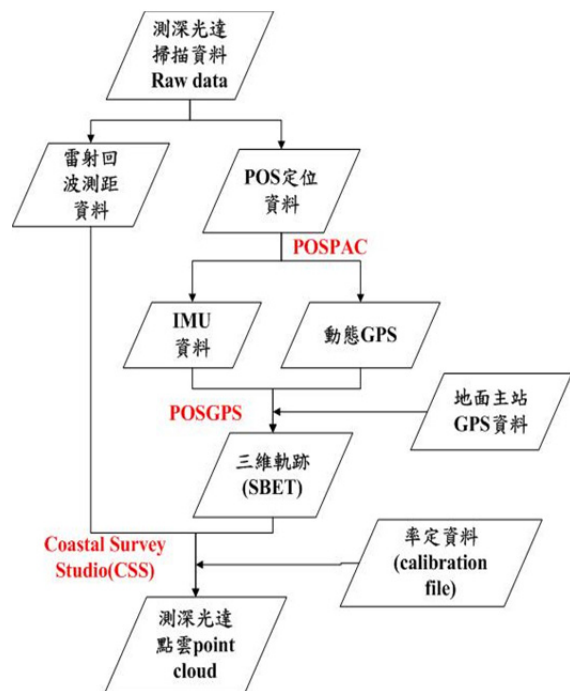


圖 12 原始掃描資料產製點雲流程圖

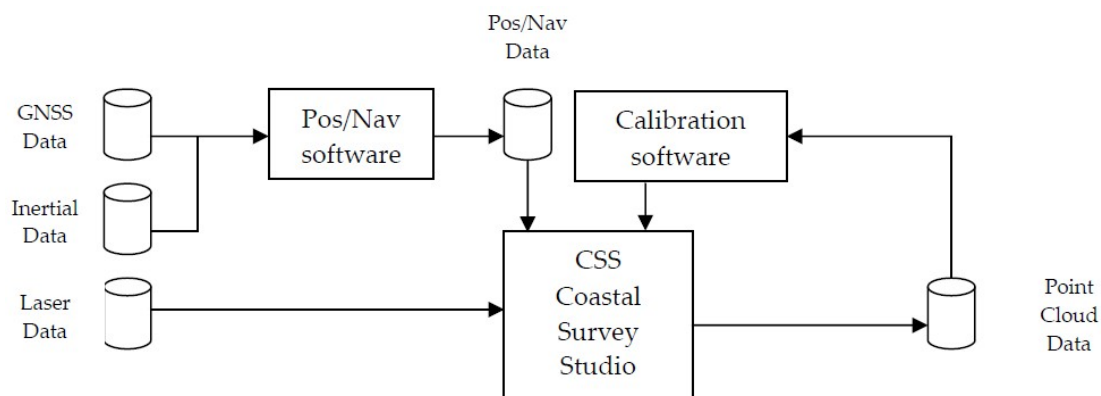


圖 13 CSS 軟體處理流程(AHAB, 2009)

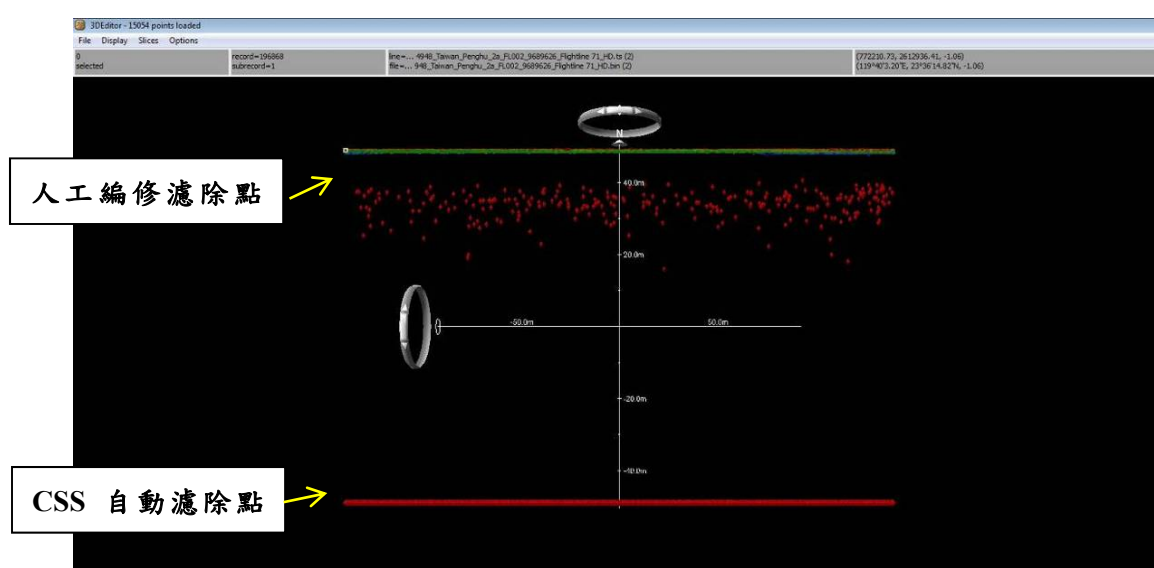


圖 14 點雲編修畫面

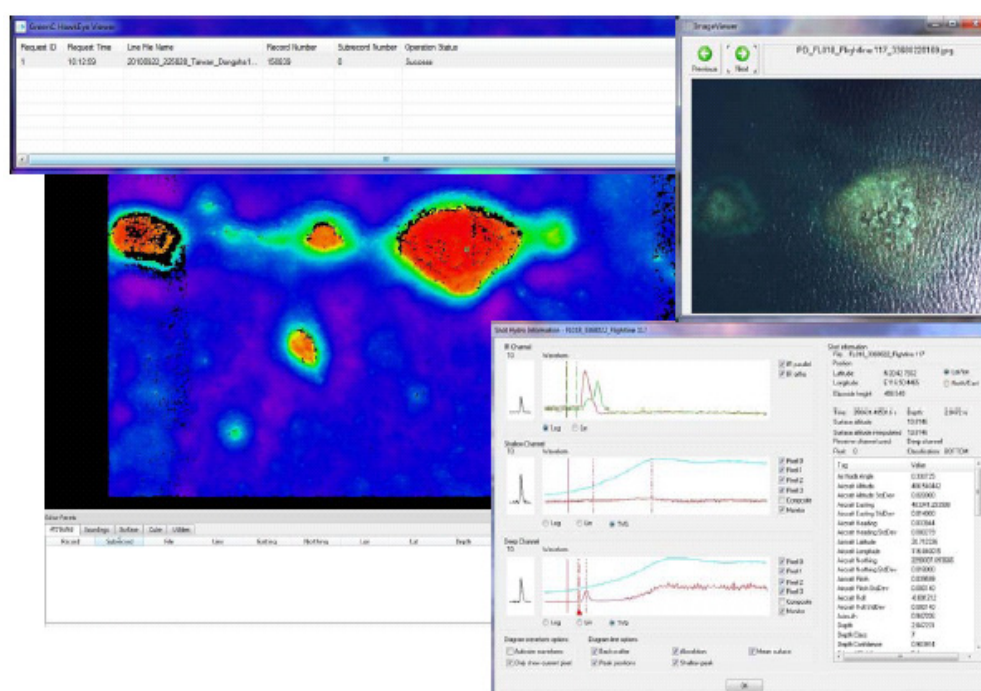


圖 15 點雲編修畫面-搭配 GreenC HawkEye Viewer

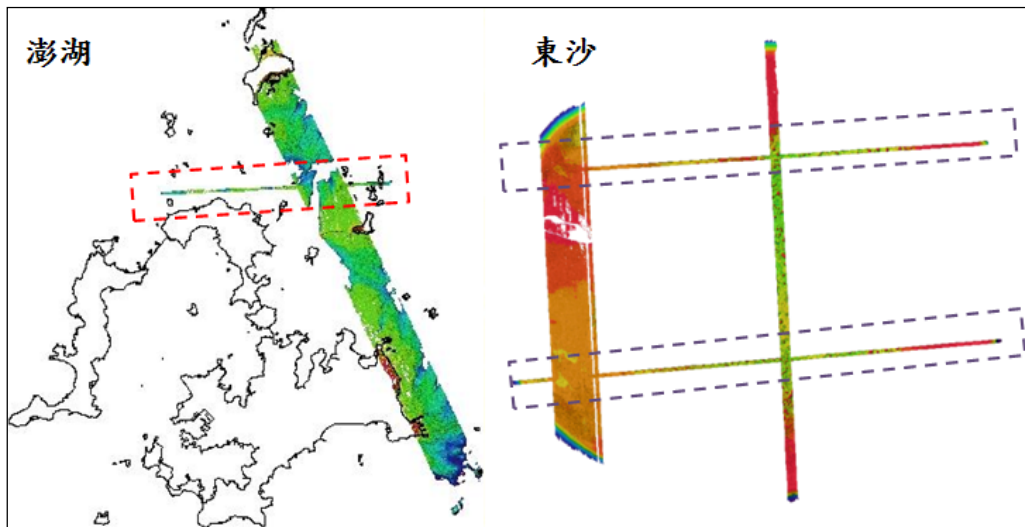


圖 16 澎湖及東沙地區交叉檢核線

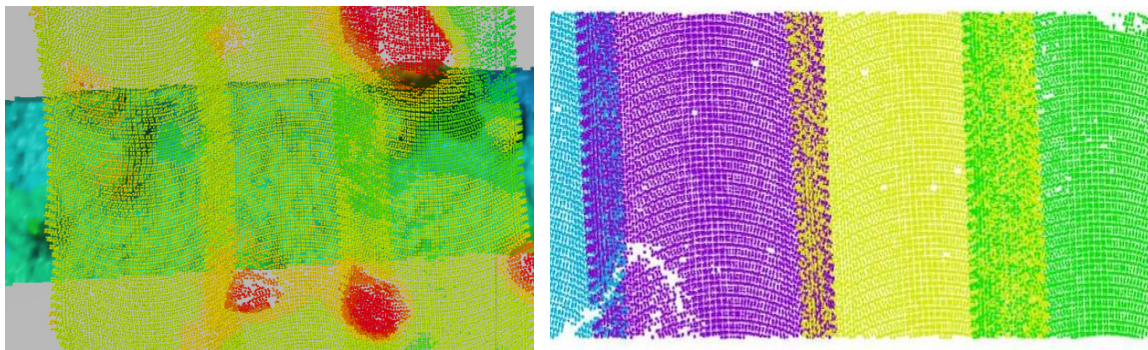


圖 17 交叉航線(左)及重疊航線(右)

內部精度分為交叉航線檢核及相鄰航帶比對兩部分，如圖 17 所示，作為檢核基準面的檢核線網格化成密度 3.5×3.5 公尺之地形面，再線性內插出與南北方向之測線點相同位置點之高程逐點比對高程值計算較差。

相鄰航帶間重疊部分約 15%至 30%，共統計 6 個航次之數據，以左方航帶為基準面與右方航帶比對高程值，用以評估相對精度。另亦比較密度 2×2 公尺之加密測區與一般測區之重疊區域之成果，分析不同足跡(footprint)大小對獲取地形之影響，因密度 2×2 公尺加密測區之雷射足跡較小，可測得解析力更佳且更深處之地形。

3.5 水深驗證測量

為驗證澎湖地區及東沙地區測深光達水深資料之精確度，於測深光達資料建置完成後，前往澎

湖地區及東沙島進行水深資料現地量測，由於測深光達與各種聲波測深儀器之足跡點(footprint)大小不一，作為驗證之用時盡量以海床平坦之處為優先選擇。

測量作業以單音束測深儀施測為主，設備如表 8 所示。本次作業採用 Odom Hydrotrac 200kHz 單音束測深儀，其測深精度： $0.01\text{m} \pm 0.1\%\text{depth}$ (測深值)，音鼓可測深範圍 0 至 200m，可同時輸出數值及類比(熱感紙)圖面資料，以作為水深測值資料比對使用。

單音束測深儀以每 40 公尺一條測線，檢核線於垂直測線方向上，澎湖地區每 1000 公尺一條，東沙地區每 500 公尺一條，藉此檢核水深測量精度。

澎湖地區於 99 年 11 月 5 日進行水深測量作業，於同年 11 月 11 日完成約 8.2 平方公里資料蒐集，另於 11 月 30 日再度前往澎湖，並於 12 月 3 日完

成 6.5 平方公里資料蒐集，合計面積 14.7 平方公里，如圖 18 所示。除 99 年 11 月 7 日使用多音束測深儀作業外，其餘皆採用單音束測深儀施測。

99 年 12 月 2 日至 9 日進行東沙地區水深作業，因強勁東北季風影響，初步完成面積約為 3 平方公里，作業地點如圖 19 所示於東沙島南邊，因受到東沙島之地形遮蔽此處風勢較小，並於 100 年 3 月份再度前往東沙地區進行作業，於 3 月 14 日完成總數 11 平方公里。

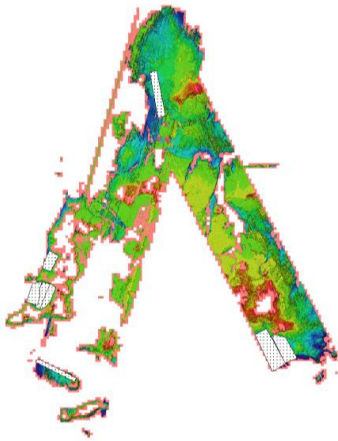


圖 18 澎湖地區水深驗證測量作業區域

所得結果與測深光達所獲取之水深資料進行比對分析，內容包括交錯檢核(cross check)之平均誤差、誤差均方根、測深等級等相關分析。

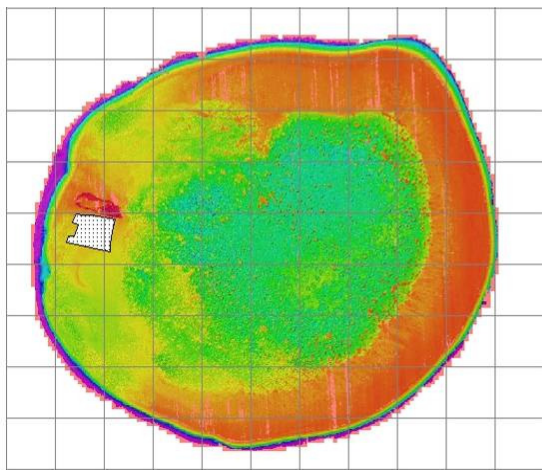


圖 19 東沙地區水深驗證測量作業區域

3.6 測深光達點雲精度分析成果

本研究進行之內部精度及外部精度所得成果概述如下，內部精度檢核項目包含交叉航線、重疊航線及東沙測區之加密測區與一般測區之重疊檢

核分別整理如表 9、表 10 及表 11，利用單音束及多音束聲納驗證測深光達數據進行高程比對成果如表 12。

就內部精度成果而言，東沙測區兩條交叉航線檢核平均較差分別為 5cm 及 7cm，標準偏差為 23cm 及 23.1cm。航帶重疊區之平均較差為 5cm，標準偏差為 30cm。

澎湖測區交叉航線檢核平均較差為 5cm，標準偏差為 23cm，重疊航線檢核平均較差為 0.1cm，標準偏差為 26.5cm。外部精度方面，在兩個測區皆可發現測深光達及聲納系統之間存在著偏差，利用單音束聲納驗證測深光達成果在東沙測區平均較差為 30cm，標準差為 24.8cm；澎湖測區平均較差為 7cm，標準差為 20.6cm。

4. 成果展示

澎湖地區及東沙地區測量成果統計如所表 13 所示，澎湖地區總計掃描航線共 139 條，點雲數目共 132,979,139 點，初步產製橢球高系統如圖 20 所示。東沙地區總計掃描航線共 267 條，點雲數目共 143,644,410 點，產製橢球高系統如圖 21 所示。東沙環礁礁台上有部分資料缺漏區，推測原因為水極淺或者是受到陽光反射導致。

由編輯後離散點雲，以內插方式建立網格水深數值檔，產製全區密度 5 X 5 公尺規則網格資料，數值檔資料採用 ASCII 純文字格式為原則，數據以公尺為單位。

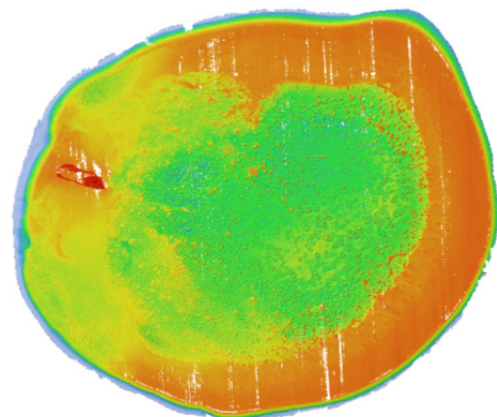


圖 21 東沙地區掃描成果(colored by ellipsoid height)

表 8 單音束儀器設備

用途	儀器型式/儀器精度及規格	儀器照片
GPS 定位系統	Leica GPS System 500衛星定位儀 垂直精度： $\pm 5\text{mm} + 1\text{ppm}$	
	Trimble 5700衛星定位儀 垂直精度： $\pm 5\text{mm} + 2\text{ppm}$	
水深測量	ODOM Hydrotrac測深儀 測深精度： $0.01\text{m} \pm 0.1\% \text{depth}$ 音鼓測深範圍0~200m	
	TSS-320B湧浪補償器 量測範圍 $\pm 10\text{m}$ 精度： $> 5\text{cm RMS}$	

表 9 交叉航線精度檢核

測區	澎湖	東沙	
檢核線	單一檢核線	北方	南方
檢驗點數	422,277	93,895	139,190
較差平均值(m)	-0.054	0.053	0.067
較差標準差(m)	0.233	0.230	0.231
平均值+2x標準差(m)	0.529	0.514	0.529
較差小於0.5m(%)	95.12%	96.49%	97.38%

表 10 重疊航線精度檢核

測區	澎湖	東沙
檢驗點數	12,536,400	14,125,019
較差平均值(m)	0.001	0.053
較差標準差(m)	0.265	0.301
平均值+2x標準差(m)	0.589	0.638
較差小於0.5m(%)	95.19%	95.35%

表 11 東沙測區 2 X 2 公尺及 3.5 X 3.5 公尺精度檢核

檢驗點數	2,904,386
較差平均值(m)	0
較差標準差(m)	0.234
平均值+2x標準差(m)	0.597
較差小於0.5m(%)	95.61%

表 12 測深光達以聲納驗證檢核成果

測區	澎湖	東沙
檢驗點數	2,066,762	2,470,493
較差平均值(m)	-0.071	0.304
較差標準差(m)	0.206	0.248
平均值+2倍標準差(m)	0.959	0.801
較差小於0.5m(%)	64.11%	78.32%

表 13 各航次航線及點雲數目統計表

航次	航線數目	點雲數目	航次	航線數目	點雲數目
澎湖地區			東沙地區		
20100906	14	18,968,807	20100921	39	29,603,977
20100912 I	18	12,183,823	20100922 I	27	13,634,942
20100912 II	12	18,161,840	20100922 II	22	16,285,567
20100913 I	10	11,636,720	20100923 I	35	16,850,890
20100913 II	13	11,411,313	20100923 II	35	22,592,742
20100915 I	10	13,655,010	20100924 I	22	15,667,580
20100915 II	20	30,161,758	20100924 II	6	5,621,664
20100916 I	22	1,819,220	20100924 III	35	6,354,174
20100916 II	20	14,980,648	20100925 I	6	3,913,525
總計	139	132,979,139	20100925 II	5	568,797
			20100925 III	8	3,166,938
			20100925 IV	26	3,011,030
			20100925 V	1	18,410
			總計	267	143,644,410

5. 結論與建議

回顧本案成果，澎湖地區扣除天氣等因素影響，實際飛航測量時間約 5 天，獲取約 415 平方公里之數據；而東沙地區花費共 5 天，獲取約 500 平方公里數據。由此觀之，空載測深光達確實具有作業快速之功能。就資料品質而言，東沙地區十分良好，澎湖作業期間因遭逢兩個颱風經過導致水質混濁，導致部分數據品質較差且較不完整。同時，澎湖作業東區，因無颱風影響，品質相當理想，與西區相較，完全不同。由此觀之，空載測深光達作業受水質之濁度影響甚大。施測區域與時機，對作業成敗十分關鍵。

就飛行器選擇而言，本次作業所用之 Swearingen SA-226T 航空器並非適當。首先，該航空器之機艙離地過高，儀器置入與取出時須以堆高機(Forklift)配合作業，由於需舉高幾至該堆高機之上限，儀器平衡十分關鍵，增加作業風險甚多。其次，測深光達產生大量熱能，在中緯度與高緯度地區，由於環境溫度低，散熱問題不大。在台灣地區，則散熱成為一項重要問題。Swearingen SA-226T 為

圓形機體，艙面板離空照窗較遠，同時，艙面板對機艙內空調產生阻絕效果，使得儀器散熱不易。本次作業便曾因儀器過熱導致損壞而須修理，影響作業時程。因此，飛行器之選擇十分關鍵。

有關於空載測深光達數據處理，其流程與陸域空載光達相同，均需解算飛行軌跡、產生點雲、進行編修。但是，其編修方式與所需作業環境大不相同。究其因素，首先，測深光達目前均為以全波形(Full Waveform)方式記錄，而且有多個波段。相對於陸域空載光達，基本上為以離散性回訊(Discrete Echo)為處理對象，因此，所需介面不同。其次，就點雲編修而言，空載測深光達方式與聲波測深相近。因為水底並無屋舍、樹木，與一般陸域情況不同。此外，陸域光達一般過濾原則為降低誤判非地面點為地面點之機率，亦即降低第二類誤差(Type II error)，相對上可承受較高之第一類誤差(Type I error)。對空載測深光達而言，由於測點較少，不能承受高第一類誤差，兩者編修理念迥異。

最後，有關於空載測深光達未來之推展，謹分析如後。首先，空載測深光達受到水質濁度影響大，並非所有水域均適合。其次，由於測深光達儀器昂

貴，而且儀器保養、操作，均有遠較陸域光達為高之難度，若測區水深大於 20 公尺，則船載聲波測深技術可提供遠較為經濟有效之作業。因此，空載測深光達適用於水清而且淺或多礁之處，而並非用於直接取代聲納測量。同時，測深光達儀器發展近年頗為蓬勃。除 Fugro LADS III、Optech CZMIL，等外，Optech Aquarius、Riegl VQ-820-G、AHAB Chiroptera，為針對水深 10m 以內、穿透度為一個沙棋盤深度之「輕量級」(Light version)系統。雖然各系統發展成熟時間尚非確定，效能亦有待評估，大變化之可能性卻也相當高。

而就未來規劃策略而言，引入空載測深光達有下列幾個可行方案：

- (一)自購空載測深光達系統，訓練操作與資料處理人才，組織本土能量；
- (二)租用國外系統，自行培育或聘任國外顧問指導，進行操作與資料處理；
- (三)規劃測量案，與國際服務供應商洽約，委託測量。

在執行層面，三案各有難處。就自購系統而言，是否具有經濟效益，是一個關鍵。而自購系統，又可分為整組採購或採購元件由國內團隊組裝開發兩種，國內組裝發展可有較深層之技術引進，但是風險相對提高，不確定性增加。第三案，與國際廠商議約是以完成測量標的為考量時風險較低者，但是，執行面亦有其複雜度。本案執行之初，即致力於探討最適合之作業時間，由歷史性雲幕高資料統計歸納(史天元等，2009)。但是，最後無法在所分析得到之最佳年度與季節作業。此一結果，肇因於與服務供應商間洽約之高不確定度。由於空載測深光達服務之稀少性，各個供應商時程多均十分緊湊。而航空測量受到天候、各地航空規定、各國政府對航空測量之管制，等因素，服務供應商評估風險時，任何不確定性均會造成憂慮，而反映在其報價之中。洽約完成後，作業時程仍有變數，就以本案經驗而言，2010 年冰島南部的艾雅法拉火山於 2010 年 3 月 20 日和 4 月 14 日的兩次火山爆發，釋放出大量的火山灰，對全球航空以及氣候等方面造成了一定影響。由於本案飛行器來自歐洲，因其作業及巡弋

飛行高度之空域，受到火山灰影響，對其前案產生延誤，故亦對本案造成衝擊。

海洋測量，尤其是近岸水深測量，近年已為多國政府制定政策發展之重點。亞洲國家如中國(China Daily, 2011)、韓國(Shin, et al., 2011)，便正在加速近岸水深測量之進展。除海岸管理與經營等標的外，近岸風力發電亦為重點之一(Ding, et al., 2011)。面對非核世代之來臨，如何善用可永續經營之能源，已是一項十分急迫之課題。台灣當亦應有所因應，而各項測深技術，包含空載測深光達，均宜有人才養成與技術引進之規劃。

致謝

本案執行承蒙海巡署、國防部、空軍司令部、民航局、營建署等多個單位，惠予協助，謹此致謝。本案能順利執行完成，完全倚靠各單位之協助與付出。其中，海巡署東沙指揮部、空軍東沙分隊、海洋國家公園管理處東沙工作站，對東沙作業無論運補、場地規劃、後勤服務、與作業時期之運油、塔台引導、製冰等各項勤務支援之付出，均至為關鍵。國防部情報次長室、空軍空域管制席、民航局高雄國際機場及航管單位、海軍大氣海洋局，在整個作業中幾乎全程協助，特此致謝。此外，中華航空公司、德安航空公司之專業服務，亦對本案極為關鍵，謹此誠心敬表謝意。在議約時期，中華民國仲裁協會郭厚志先生、交通大學購運組、智慧財產組、中興測量公司，提供許多協助與諮詢，亦敬此致謝。最後，交通大學執行團隊要向本次提供航空測量作業之 GDS 與 Pelydryn 團隊，尤其是 Mr. Dushan Arumugam 表達感謝。本次作業所有數據處理均在我國境內進行、完成，所有蒐集之數據，包含原始全波形資料，均完整交付，全程並依照資訊安全保全規定執行。作業中許多意料之外的事情，均倚賴 Dushan 的諒解與交涉。全案完成後，雖然所有成果均已滿足 IHO 規範及合約要求，Dushan 仍再度來台以最新版之 CSS 程式重新處理，以確認本次成果為可能達成之最優，尤為感念。

參考文獻

- 史天元、廖杞昌、王慧蓉、陳杰宗、陳佳勳，2009。
空載光達飛航雲因風險機率計算研究：以馬公
機場為例，航測及遙測學刊，14(3):211-223。
- 史天元、薛憲文、王慧蓉、陳杰宗、陳佳勳，2010。
測深光達原理、現有系統與服務，地籍測量，
29(1):44-58。
- 李培芬、史天元、陳杰宗、陳佳勳，2011。東沙環
礁：生物與地質的邂逅，大自然，7月號，
16-23。
- 海洋國家管理處，2010，東沙環礁，
http://marine.cpami.gov.tw/chinese/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=47，上次查訪：2011-03-12。
- China Daily, 2011. Seabed mapping pace speeds up,
http://www.china.org.cn/wap/2011-09/14/content_23413481.htm, last accessed on Nov. 21, 2011.
- Ding Yan, Katsutoshi Kozai, Teru Ohsawa, Nobuki Tsubouchi, 2011. Evaluation of offshore wind energy resource in Chinese coastal sea using Quikscat data, Proceedings of International Symposium on Remote Sensing, Yeosu, Korea, Nov. 2-4, 2011, TB302.pdf.
- Guenther, G.C., 1985. Airborne Laser Hydrography. System Design and Performance Factors, NOAA Professional Paper Series, 1. Rockville, Md: U.S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean.
- Guenther, G. C., Cunningham, A. G., LaRocque, P. E., and Reid, D. J., 2000. Meeting the Accuracy Challenge in Airborne Lidar Bathymetry, Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, Dresden/FRG, June 16 - 17, 2000.
- Isaksson, A., 2009, Coastal Survey Studio Mark II Manual Version 2.X, Airborne Hydrography AB.
- Henrick, K., 2006. HawkEye II Technical Description, Airborne Hydrography AB.
- Shin, Myoung Sig, Jae Young Roh, Sun Woong Kim, and Kwang Jae We, 2011. Shoreline Survey Project Status in Korea and future expectation, 12th Annual JALBTCX Airborne Coastal Mapping & Charting Technical Workshop 21-22 June 2011 Baltimore, MD.

On The 2010 Bathymetric Lidar Survey of Penghu and Dongsha Atoll

Tian-Yuan Shih^{1*} Shiahn-Wern Shyue² Fu-Daw Hsio³ Ya-Hsing Chen⁴
Chai-Yung Hsu⁵ Jie-Chung Chen⁶ Jia-Hsun Chen⁷

ABSTRACT

Airborne Bathymetric Lidar systems utilize aircraft as the platform performing laser scan for surveying the underwater topography. The spectral band used for this laser is green, which can penetrate water and backscattered on the sea floor. This technology is best suited for area characterized as shallow and low water turbidity. Comparing with sonar based methods, airborne laser hydrography is featured with high efficiency and particularly suitable for areas with shoals and other risks for navigation.

In order to fully utilize advanced technology for bathymetric mapping in Taiwan, and collect the bathymetric information of Dongsha atoll, Ministry of Interior planned a surveying project in 2008 for mapping Dongsha atoll and Penghu. This project is granted to National Chiao Tung University for execution. The aerial survey was performed with an AHAB Hawkeye II lidar system installed on a SA-226 aircraft, in August and September of 2010. 500 square kilometers in Dongsha, and about 400 square kilometers in Penghu were surveyed at spatial density of 3.5 meter by 3.5 meter. An area of 20 square kilometers located in the east portion of the atoll is surveyed with 2x2 meter resolution at lower flying height. Both cross flight and overlaps are compared for quality control. Sonar survey is also conduction for further validation. The survey result meets the IHO 1b specification.

This article reviews the aerial surveying, data acquisition and editing, accuracy assessment and validation. The critical issues are discussed for the reference of future development and application of airborne bathymetric lidar in Taiwan.

Keywords: Full waveform, aerial survey

¹ Professor, Disaster Prevention & Water Environment Research Center,
National Chiao Tung University

² Associate Professor, National Sun Yat-sen University Department of Marine
Environment and Engineering

³ Director, Department of Land Administration, Ministry of Interior

⁴ Dupty Engineer, Disaster Prevention & Water Environment Research Center, National Chiao Tung University

⁵ Project Assistant, Disaster Prevention & Water Environment Research Center, National Chiao Tung University

⁶ Section Chief, Department of Land Administration, Ministry of Interior

⁷ Staff, Department of Land Administration, Ministry of Interior

* Corresponding Author, Phone: 886- 3-5712121 ext.54940, E-mail: tyshih@mail.nctu.edu.tw

Received Date: Nov. 29, 2011

Revised Date: Feb. 16, 2012

Accepted Date: Feb. 25, 2012

東沙島周圍海草分布特徵

孫筱雲¹ 柯佳吟² 李培芬^{3*}

摘要

海草為淺海域水質與污染的敏感指標，透過萃取則可用於多類產品的開發，具有高度的生態與經濟價值。東沙島為茂密的海草床所環抱，出現的海草至少有六種，占全世界海草種數的 10%，是為亞洲地區海草的分布重鎮。本研究結合東沙島周圍海草床的地面調查與測深光達資料 (LiDAR)，探討東沙島周圍海域海草的分布特性，並以橢球高 (altitude) 作為調查點平均水深的基礎，分析各項海草因子與水深之間的關係。調查結果顯示，水深範圍從 0 到 6.8 公尺處皆有海草分布，混生情形從單種到四、五種海草共存，在水深 1 到 3 公尺可觀察到最多種類的海草共存，水深 1 公尺內則多為單種或兩種海草混生；而在水深小於 3 公尺的樣點中，有超過 93% 出現海草，覆蓋度以 50% 到 80% 的頻度最高；從各種海草的分布來看，圓葉水絲草與泰來草的分布深度顯著小於水韭菜與鋸齒葉水絲草。整體而言，東沙島周圍海草大致呈現固定的種類分布，水深則是影響不同種類海草分布與共存之重要因子，並影響海草在東沙島周圍的地理分布。此外，由測深光達資料衍生之環境因子 (如水深) 有助於生物分布與生態監測研究。

關鍵詞：東沙島、海草、測深光達、分布

1. 前言

全海草為沉水性開花植物的統稱，在被子植物 (angiosperms) 演化歷史的早期，即距今約一億年前已開始出現 (Duarte, 2001)，與海藻不同，具有真正的根、莖、葉，會開花、結果並產生種子，也可進行無性繁殖。全球的海草不到 60 種，分為 4 科 12 屬 (Short *et al.*, 2007)，占不到所有開花植物總種數的 0.02% (Duarte, 2001)，廣布於熱帶與溫帶淺海域，除南極洲外皆有出現，覆蓋面積超過 177,000 平方公里 (Green and Short, 2003)。海草在生態上扮演基礎物種 (foundation species) 的角色 (Hughes *et al.*, 2009)，是幼蝦、稚魚、海馬、儒艮、海龜及無脊椎動物繁殖、孵幼與藏匿的地點或主要的食物來源 (Beck *et al.* 2001; Orth *et al.*, 2006)，同時也是附生動、植物的重要基質 (Duarte and Chiscano 1999)，與許多瀕危的保育類生物有關 (Hughes *et al.*, 2009)，亦與珊瑚礁、紅樹林、

大型海藻床等其他棲地有密切的交互作用，可促進營養鹽在底質與水層和各棲地之間的循環 (Beck *et al.* 2001; Hemminga and Duarte, 2000; Green and Short, 2003; Marbá *et al.*, 2006)。此外，海草植被的結構也影響環境中的物理因子，可穩定底泥沉積物、過濾海水、減緩波浪、調節海水流量、穩定橋樑與堤防基質 (Koch *et al.*, 2006; Hemminga and Duarte, 2000)，生態功能繁多。

Short 等 (2007) 將全球海草分布分成六個生態地理區 (bioregion)，而台灣附近海域所屬的熱帶印度太平洋區 (Tropical Indo-Pacific) 為物種多樣性最高的區域，在熱帶印度太平洋區中的海草床多為混生而少有顯著的優勢種 (Björk *et al.*, 2008)，且在該區時可見到海草著生於珊瑚礁平台 (Short *et al.*, 2007)。過去研究台灣海草分布的資料相當有限，相較於陸生植物，國內幾座主要標本館的海草標本數量也相當稀少 (柯智仁, 2004)。台灣的海草分布於台灣西部海岸、恆春半島、綠島、蘭嶼、

¹ 國立臺灣大學生態學與演化生物學研究所 研究生

² 國立臺灣大學生態學與演化生物學研究所 博士後研究員

³ 國立臺灣大學生態學與演化生物學研究所 教授

*通訊作者，電話：02- 33662469, E-mail: leepf@ntu.edu.tw

收到日期：民國 100 年 06 月 30 日

修改日期：民國 100 年 08 月 29 日

接受日期：民國 100 年 10 月 18 日

小琉球、澎湖群島、金門島與東沙環礁，目前計有 10 種（柯智仁，2004）。其中，東沙環礁將風浪阻絕在外，提供了海草一個安全且寬廣的礁岩平台，海草於東沙海域的分布十分廣大且豐度高，但由於地處偏遠不易到達，以致最近幾年才開始累積基礎資源調查成果。到目前為止，東沙島附近海域曾記錄到的海草至少有七種（Lin *et al.*, 2005），分別為泰來草（*Thalassia hemprichii*）、卵葉鹽草（*Halophila ovalis*）、單脈二藥草（*Halodule uninervis*）、圓葉水絲草（*Cymodocea rotundata*）、鋸齒葉水絲草（*Cymodocea serrulata*）、水韭菜（*Syringodium isoetifolium*）及鐮葉叢草（*Thalassodendron ciliatum*），這些種類均可在珊瑚沙（coral sand）與珊瑚碎屑（coral debris）構成的底質中生長（柯智仁，2004），在東沙島周圍單獨出現或與其他種類混生。

對於所有海草而言，物種的分布情形都是有性生殖與無性繁衍造成的結果，受到了播遷與生長條件的限制（Spalding *et al.*, 2003）。不論是自然或人為的因素都可能造成海草床的破壞與衰退（Orth *et al.*, 2006; Short and Wyllie-Echeverria, 1996），溫度、鹽度、光線、壓力、潮汐、水體的流動（波浪或洋流）等地理條件，以及營養鹽、沉積物、附生動植物、疾病、颱風、氣候變遷與人為活動（Short *et al.*, 2001），都會影響海草的分布情形，而表現在大尺度或微細的環境上。在海草床遭受破壞或發生衰減之前，海草多樣性與分布的紀錄即十分重要，為海洋資源的經營管理所必需（Short *et al.*, 2001）。

東沙島人員稀少，位處於海洋國家公園管理處所管理的東沙環礁國家公園內，附近海域受陸域影響較小，是觀察與監測海洋生態與全球氣候變遷的絕佳場所。然而由於環境、資源與技術的限制，在水深甚淺的東沙島周圍執行全面性調查的成本甚高，不只是海草資源缺乏大範圍的連續性資料，沿海水域的環境因子亦多空白。2007 年，東沙島離岸 500 公尺內首次有較為完整的水深資料，方法是以單音束聲納、每 100 公尺對一斷面進行實測；而 2010 年 9 月底，內政部委託進行的測深光達（Light Detection And Ranging，簡稱 LiDAR）計畫則利用

航空負載的儀器，突破傳統沿海測深的技術限制，遙測取得水平解析度 3.5×3.5 公尺、垂直解析度約為 20 公分的橢球高值（altitude）與測量當時的水深資料（史天元等，2010）（史天元等，2011），在解析度上非常適合作為研究海草與環境因子關係的資料來源。

由於過去研究東沙海草的文獻皆缺乏點位資訊，資料多以地理範圍表示，樣區也僅限於沿岸（Lin *et al.*, 2005；林幸助等，2010），除了是資料的解析度較小，在後續比較與利用上也較侷限，與其他資料整合時易出現問題，同時亦缺乏離岸較遠的海草床資訊。此外，從衛星影像中可觀察到，東沙島南方離岸 2 到 3 公里處都可能有海草的存在，因此本團隊以精確的點位方式，對東沙島周圍海草床進行較大範圍的調查，以能對東沙海草有更完整的認識，同時配合測深光達取得之深度資訊，探討海草分布與水深之關係，供未來經營管理時使用。

2. 研究方法

2.1 海草調查方法

本研究於 2008 到 2010 年三個年度，以浮潛或潛水方式，對東沙島周圍海草床分別進行為期兩周的現場調查，時間分別是 2008 年 7 月 31 至 8 月 4 日、2008 年 9 月 4 日至 9 月 11 日，以及 2009 年 7 月 23 日至 8 月 4 日，與 2010 年 9 月 31 日至 10 月 12 日。在考慮人力、資源、可及性與時間限制的因素下，每年沿東沙島周圍設置七至十條“ Γ ”字型穿越線，以每 60 公尺選一樣點為基礎，對距離海岸線約 500 公尺內的海草床核心區域進行抽樣調查，三年共計有 399 個樣點的資料；此外，為了涵蓋更大的範圍，以了解衛星影像上所見疑似為海草床邊緣的實際情形，本研究使用吃水較淺的船隻作為移動工具，在離岸較遠的水域隨機選取樣點進行潛水調查，三年共計有 30 個船潛樣點（圖 1）。在每一個樣點上除了進行 GPS 定位、照相與採樣以取得座標、海草種類與棲地資訊外，並以邊長 50 公分的方框，計算海草葉片的百分比覆蓋度。

2.2 深度數值的取得

測深光達原理是使用綠光波段雷射光束穿透水層，取得海床與當時海水面相對於 WGS84 橢球面的高度，而求出測量處的橢球高與當時水深（史天元等，2011）。本研究在利用地理資訊系統（GIS）整合所有海草調查點與測深光達的資料後，利用內差法自原始的測深光達數據推估海草調查點的橢球高與當時水深，結果顯示本研究的海草調查點落於橢球高 5.9 至 12.7 公尺處，而這些位置在 2010 年 9 月測深光達施測時的水深為 0 到 7.5 公尺。由於施測時的水深會受到當時潮汐與洋流的影響，本研究選用橢球高值作為東沙島周圍海域的地形依據，並透過運算將橢球高值轉換成相對深度，模擬該地的平均水深，方便瞭解其對海草的生態意義。本研究使用海草調查時的下水點—橢球高 12.7 公尺處作為基準，該值等高線在東沙島四周與潟湖內大致與岸際吻合，故以 12.7 減去橢球高作為各調查點的模擬水深值，與各項海草因子進行後續的分析與討論。



圖 1 本研究調查樣點包含近岸穿越線上的 399 個樣點與離岸的 30 個船潛樣點

2.3 資料的選取與分析

現場調查取得的各項海草因子包含海草種數

（species richness）、葉片的百分比覆蓋度（leaf percentage cover）與海草種類，本研究主要針對近岸穿越線的 399 個樣點，探討東沙島周圍海域上述海草因子與深度之間的關係。針對海草種數與百分比覆蓋度兩個海草群落（community）特徵，本研究將東沙島周圍海域的深度分成三個等級，先以無母數假設檢定法（Kruskal-Wallis test）比較兩特徵在不同深度等級間的異同，再使用事後檢定（Games-Howell test）對深度等級間的兩特徵做兩兩比較，了解海草群落因子在各深度等級間的變化情形；而在海草種類與深度的關係上，本研究使用無母數假設檢定法（Kruskal-Wallis test）比較深度在各個海草種類的分布，並使用事後檢定（Games-Howell test）對海草種類間的深度分布做兩兩比較，了解各種海草在深度分布上的趨勢。

3. 結果

3.1 東沙島周圍海草床之地形與樣點深度

依據本研究換算出的深度值製作等深線圖疊合衛星影像並配合調查結果發現（圖 2），東沙島潟湖與西岸的海草床深度甚淺且地形平緩，大部分深度皆落於 1 公尺以內；北岸地形起伏亦小，離岸 750 公尺以上才可能達 3 公尺深，海草床大多落於 1 到 2 公尺深間，少部分延伸超過 2 公尺，接近 4 公尺的船潛處已少有海草出現；除了東岸外，南岸等深線密度為所有區域中最高，離岸 500 公尺即達 3 公尺深，地形起伏大，過 3 公尺深以上的區域才趨於平緩，而海草床在東沙島南側的範圍可由岸邊綿延至 5 公尺深以上的船潛處，本研究有海草紀錄的調查點最深可達 6.8 公尺。

相對於橢球高 12.7 公尺處，本研究 399 個近岸樣點的平均深度為 1.6 公尺，中位數為 1.6 公尺，最深為 4.5 公尺（圖 3 A）；其中，有海草出現的樣點有 370 個，約占 93%，平均深度為 3.8 公尺，中位數亦為 1.6 公尺，最深則達 3.6 公尺。而 30 個船潛樣點的平均深度為 3.7 公尺，中位數為 3.8 公尺，

最小值為 1.6 公尺，最大值達 6.8 公尺(圖 3 B)；其中，有海草出現的樣點有 21 個，佔所有船潛樣點的 70%，其深度平均為 3.8 公尺，中位數為 3.9 公尺，最淺 1.8 公尺，最深達 6.8 公尺。

3.2 群落特徵

調查結果顯示，東沙島周圍海域各區都有海草覆蓋度為 70% 以上的樣點，距離岸邊 2.5 公里處亦可調查到 3 種以上海草共存或覆蓋度為 90% 的海草床(圖 4 與圖 5)。在近岸穿越線有海草出現的 370 個樣點中，僅有 25% 的海草群落由單一類型的海草組成，其餘皆由兩種或兩種以上的海草混生，混生情形不一，最多曾在同一個樣點記錄到五種海草；海草床中最常見的為兩種海草混生的群落，約

佔近岸海草樣點的 45%，其次為單一或三種海草共存，各約 25 與 24%，四種以上的記錄為最少，僅佔約 5%(圖 6 A)。在葉片的百分比覆蓋度方面(圖 7 A)，有海草紀錄的近岸樣點主要集中於 50 到 80% 之間，平均 60%，中位數為 60%。

而在船潛處有海草出現的 21 個樣點中，各種海草種數的比例與近岸樣點差異不大，一樣最常見兩種海草共存(圖 6 B)，在所有出現海草的船潛樣點中佔了 40%，其次的為單一類型海草組成，佔有 30%，三種海草組成的樣點佔了 25%，四種以上的紀錄亦僅佔 5%。在葉片的百分比覆蓋度方面(圖 7 B)，有海草紀錄的船潛樣點變異甚大，平均為 46%，中位數為 40%。

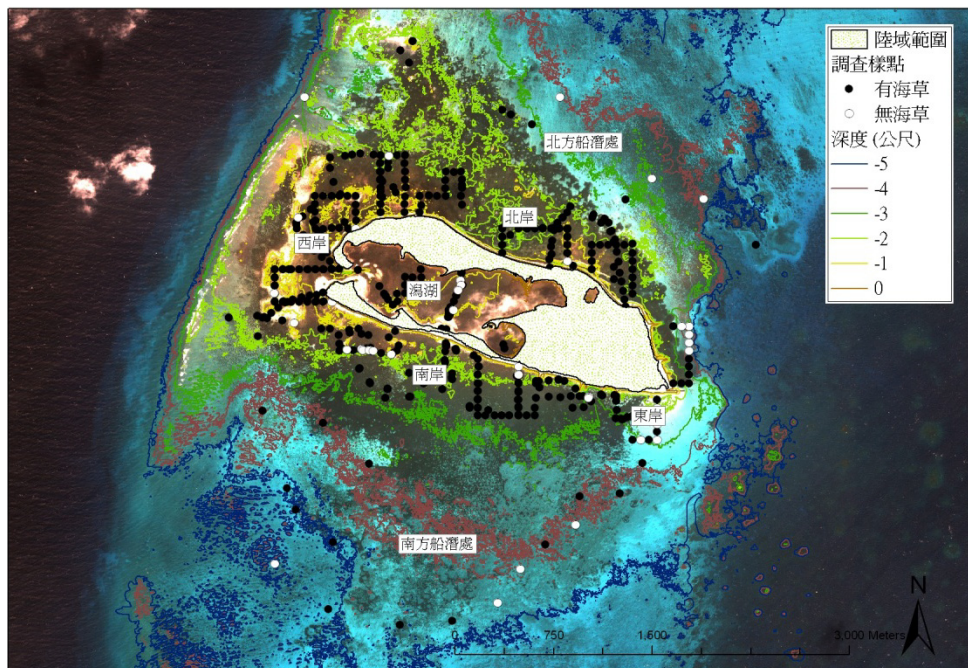


圖 2 2007 年捷鳥 (Quickbird) 衛星影像與東沙島周圍海域等深線分布

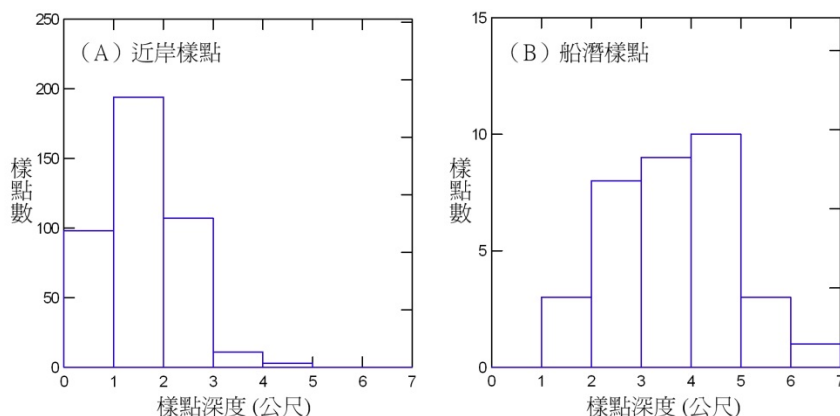


圖 3 本研究 (A) 近岸穿越線樣點與 (B) 船潛樣點的深度直方圖

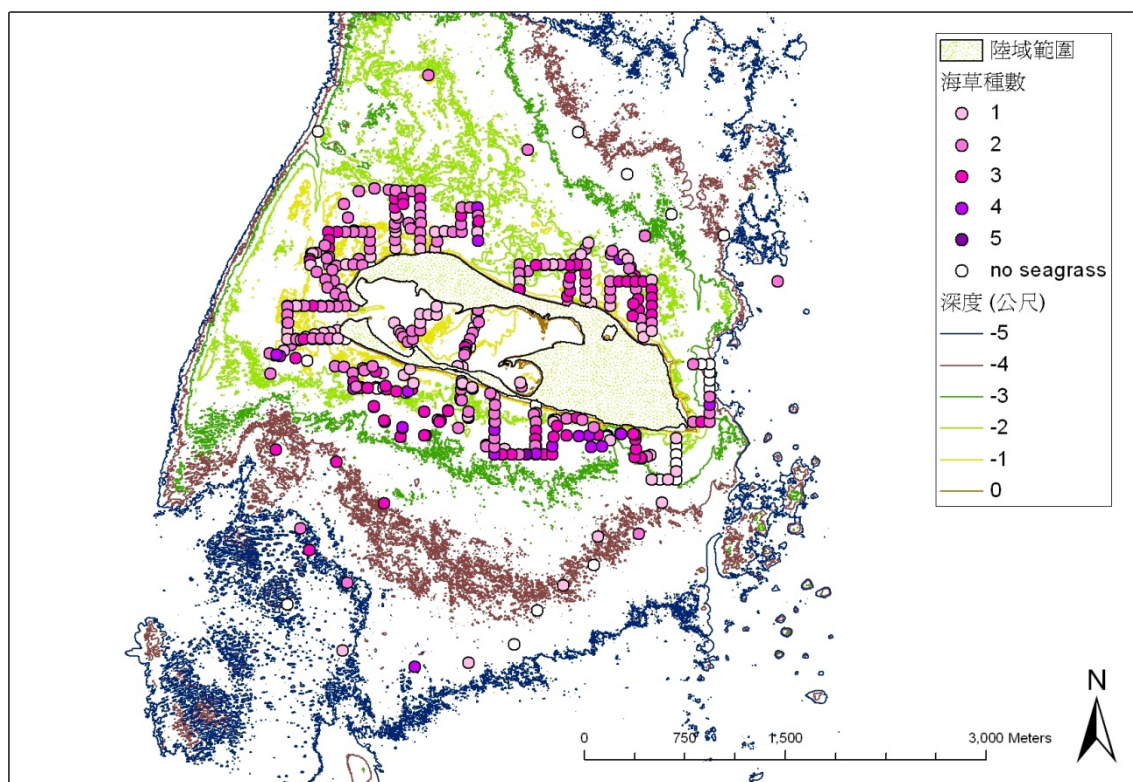


圖 4 本研究調查樣點的海草種數與東沙島周圍海域的等深線分布

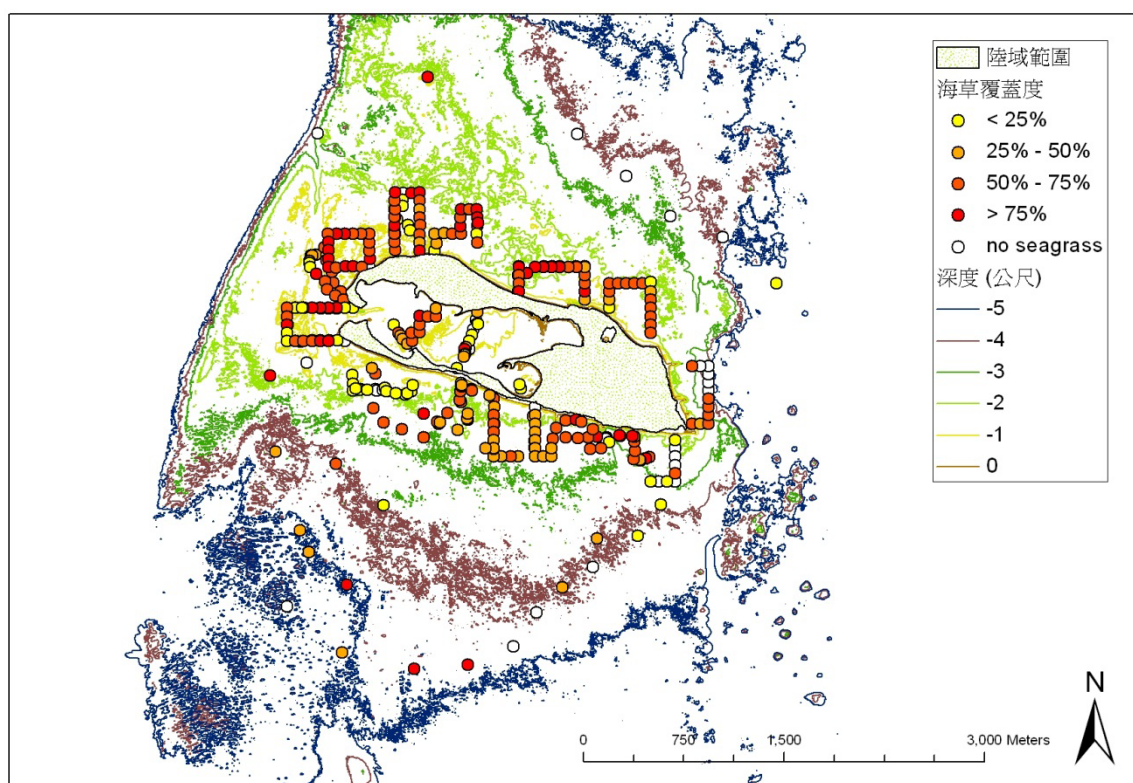


圖 5 本研究調查樣點的海草覆蓋度與東沙島周圍海域的等深線分布

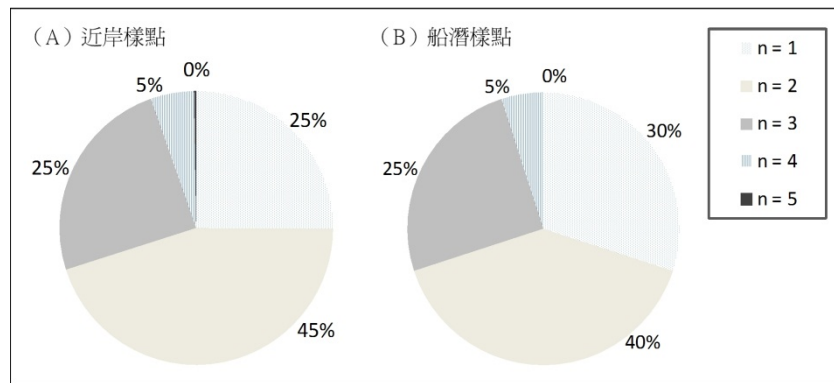


圖 6 在有海草出現的樣點中，近岸樣點 (A) 與船潛樣點 (B) 的海草種數 (n) 比例圓餅圖

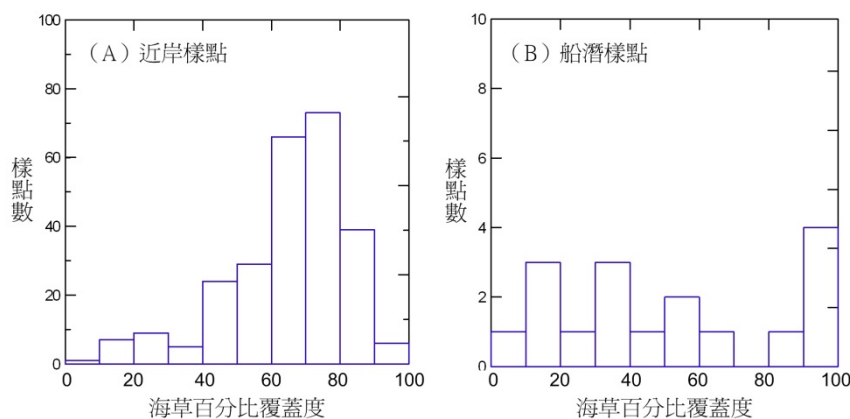


圖 7 在有海草出現的樣點中，近岸樣點 (A) 與船潛樣點 (B) 的海草覆蓋度之直方圖

在群落因子與深度的關係上，本研究僅針對近岸穿越線的樣點資料進行分析，將深度分成 ≤ 1 公尺、1-2 公尺與 >2 公尺的三個等級，分別有 93 個、186 個與 120 個樣點，出現海草的比例分別為 95%、98%與 88%。海草種數在三個深度等級間有極顯著差異(圖 8 A, Kruskal-Wallis test, $H = 20.905$, $p < 0.01$)，從事後檢定的結果可知深度 ≤ 1 公尺的海草種數顯著小於深度 1-2 公尺與深度 >2 公尺的海草種數，而深度 1-2 公尺與深度 >2 公尺的海草種數間並無顯著差異；而三個深度等級的海草種數分布如圖 9，在 ≤ 1 公尺的深度範圍內，海草床多為 1 到 2 種的海草混生，深度在 1-2 公尺則多為 2 到 3 種海草共存，深度 >2 公尺的海草床出現 3 種以上海草共存的機會較前兩個深度等級高。在海草葉片的百分比覆蓋度方面(圖 8 B)，結果顯示三個深度等級間並無顯著差異 (Kruskal-Wallis test, $H = 5.431$, $p = 0.066 > 0.05$)，代表海草覆蓋度在本研究的近岸穿越線區域，並不會隨著深度的改變而有顯著變化。

3.3 物種組成

本研究調查到的海草種類共有圓葉水絲草、鋸齒葉水絲草、水韭菜、泰來草、單脈二藥草與卵葉鹽草六種，在樣點出現的位置如圖 10。在近岸 370 個有海草的樣點中(圖 11)，圓葉水絲草出現的樣點數占全部的 70% ($n = 258$)，為所有海草出現頻度最高者，其次為泰來草，占近岸海草樣點的 64% ($n = 235$)；鋸齒葉水絲草占近岸海草樣點的 35% ($n = 130$)，水韭菜占 28% ($n = 104$)；而本研究近岸樣點出現頻度最少的為單脈二藥草與卵葉鹽草，分別占近岸海草樣點的 11%與 4% ($n = 40$ 與 14)。在船潛處 21 個有海草的樣點中，各種海草出現的多寡與近岸樣點有所差異(圖 12)，最常出現的為水韭菜，在有海草出現的 21 個樣點中占有 60%，其次為鋸齒葉水絲草，占了這些樣點的 35%，圓葉水絲草、鋸齒葉水絲草與泰來草各占了 30%，卵葉鹽草則為出現頻度最低者，占有剩下的 15%。

在近岸穿越線六種海草的深度分布上(圖 13)，

圓葉水絲草集中於 1 到 2.2 公尺處，鋸齒葉水絲草集中於 1.7 到 2.3 公尺處，水韭菜深度集中於 1.6 到 2.6 公尺，泰來草集中於 1 到 1.8 公尺處，單脈二藥草則集中於 1.2 到 2.3 公尺處；而本研究調查到的卵葉鹽草甚少，在近岸穿越線上的分布集中於 0.6 到 1.5 公尺的樣點。檢定的結果顯示六種海草在近岸穿越線上的深度分布有極顯著差異（Kruskal-Wallis test, $H = 110.181$, $p < 0.01$ ），由事後比較可得知圓葉水絲草與泰來草的深度極顯著地小於鋸齒葉水絲草與水韭菜（ $p < 0.01$ ），單脈

二藥草在該區域的深度亦顯著小於鋸齒葉水絲草與水韭菜（ $p < 0.05$ ），其餘海草間則無顯著差別。以深度等級來看，每種海草在近岸樣點出現的頻度（圖 14）顯示樣點深度在 ≤ 1 公尺與 1-2 公尺時，以圓葉水絲草與泰來草的出現頻度最高，尤其 ≤ 1 公尺處最明顯；當深度超過 2 公尺，圓葉水絲草、鋸齒葉水絲草、水韭菜與泰來草的出現次數便較前兩等級接近，而以鋸齒葉水絲草與圓葉水絲草最常見。

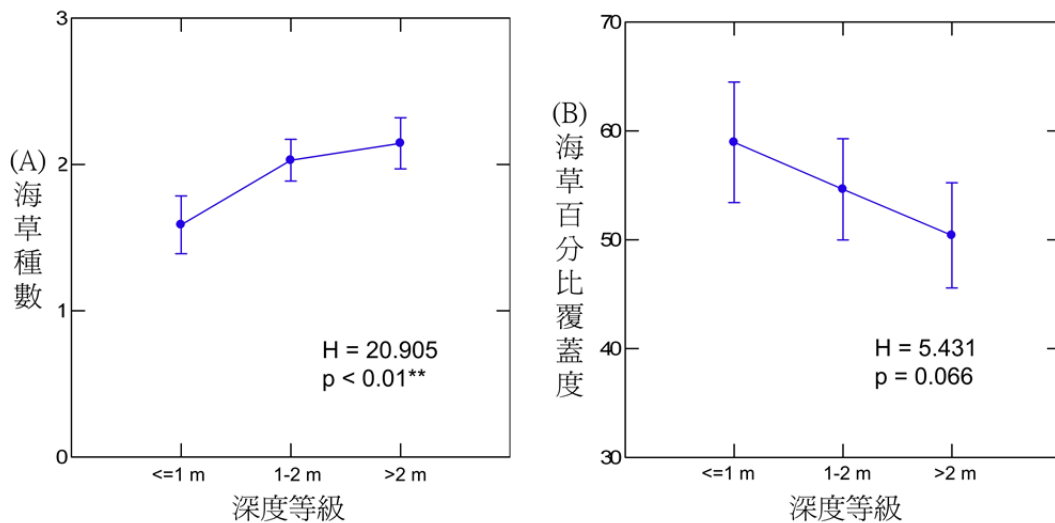


圖 8 近岸穿越線各深度等級 (A) 海草種數 (species richness) 與 (B) 百分比覆蓋度 (percentage cover) 的比較與 Kruskal-Wallis 檢定結果

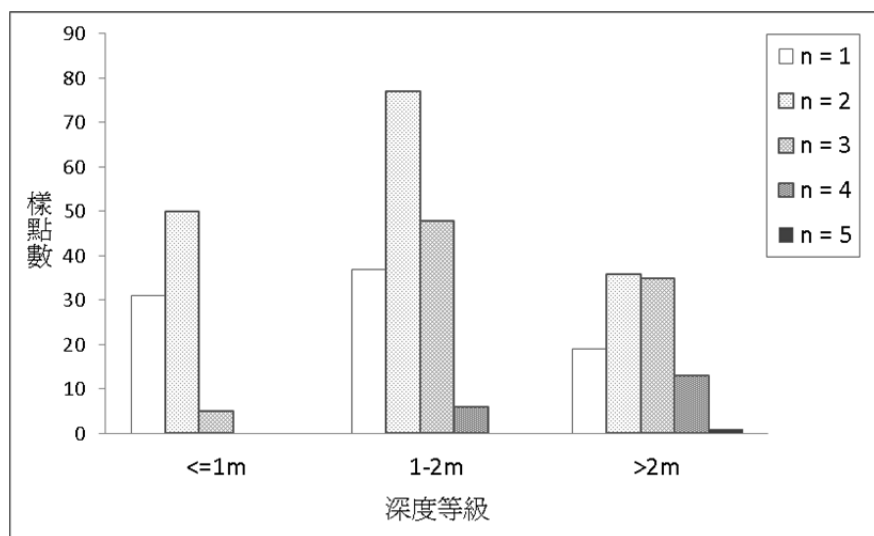


圖 9 在有海草出現的樣點中，近岸穿越線各深度等級的海草種數 (species richness, n) 出現頻度

此外，本研究在分析時發現，在 >2 公尺深度等級中的近岸樣點有 13 個超過 3 公尺深，海草出現的比例約 46%，其餘 2-3 公尺深的樣點則有 93% 以上的樣點出現海草，與 ≤ 1 公尺與 1-2 公尺深的海草床有相近趨勢。鑒於此關係與種類組成的分析結果，本研究針對船潛處深度大於 3 公尺的 20

個樣點進行海草出現比例與海草組成的觀察（圖 15），其中有海草出現的樣點數為 14 個，以水韭菜的出現頻度最高，占有 57%，其次為單脈二藥草，占有 43%，鋸齒葉水韭菜占了 36%，泰來草為 29%，卵葉鹽草 21%，出現頻度最少的種類為圓葉水絲草，僅占了 14%。

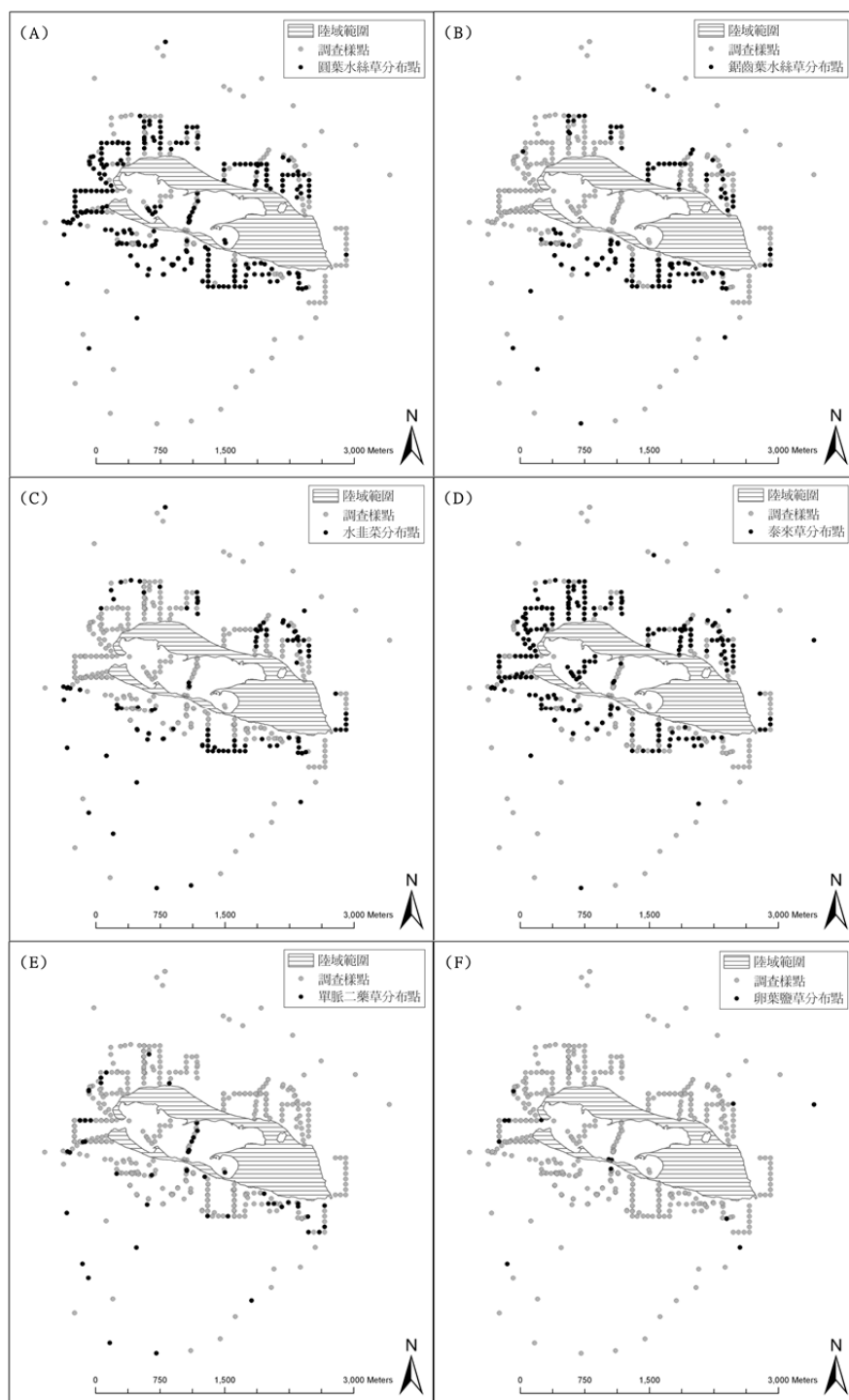


圖 10 六種海草的樣點分布圖。(A) 為圓葉水絲草，(B) 為鋸齒葉水絲草，(C) 為水韭菜，(D) 為泰來草，(E) 為單脈二藥草，(F) 為卵葉鹽草

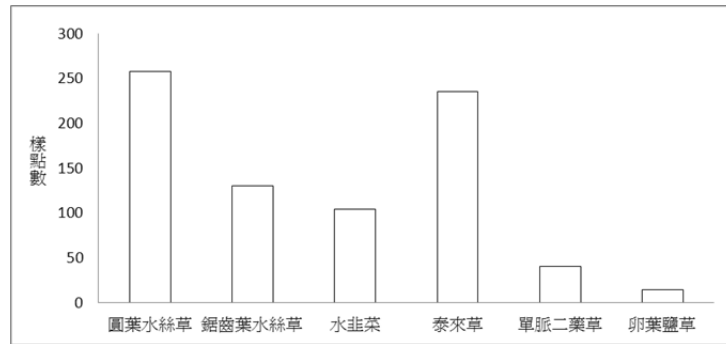


圖 11 近岸穿越線六種海草的出現頻度

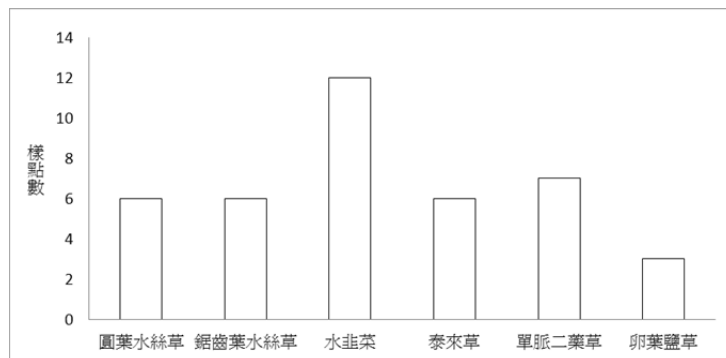


圖 12 船潛樣點六種海草的出現頻度

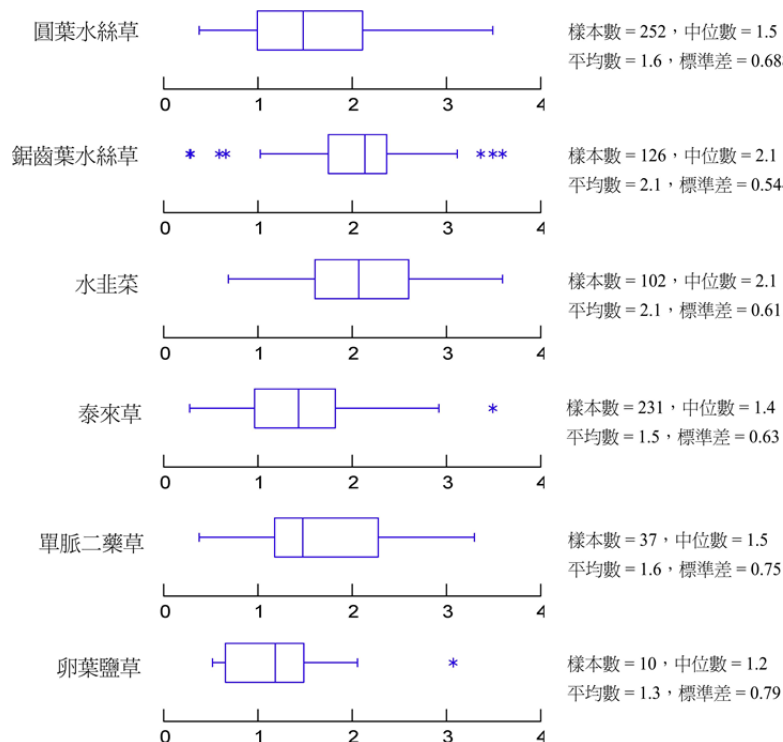


圖 13 近岸穿越線六種海草深度分布之盒鬚圖 (box plot)。盒狀區域的上界與下界分別表示第一四分位數 (lower quartile) 與第三四分位數 (upper quartile)，兩者之差為四分位差 (interquartile range，簡寫 IQR)，兩者間的縱線為中位數 (median) 的位置；位於四分位數外的鬚線 (whisker) 端點，為距離四分位數 1.5 倍 IQR 內的最大值，星點 (*) 則為距離四分位數 1.5 倍 IQR 外的離群值 (outlier)，圓點 (°) 為距離四分位數 3 倍 IQR 外的離群值 (本資料無)。

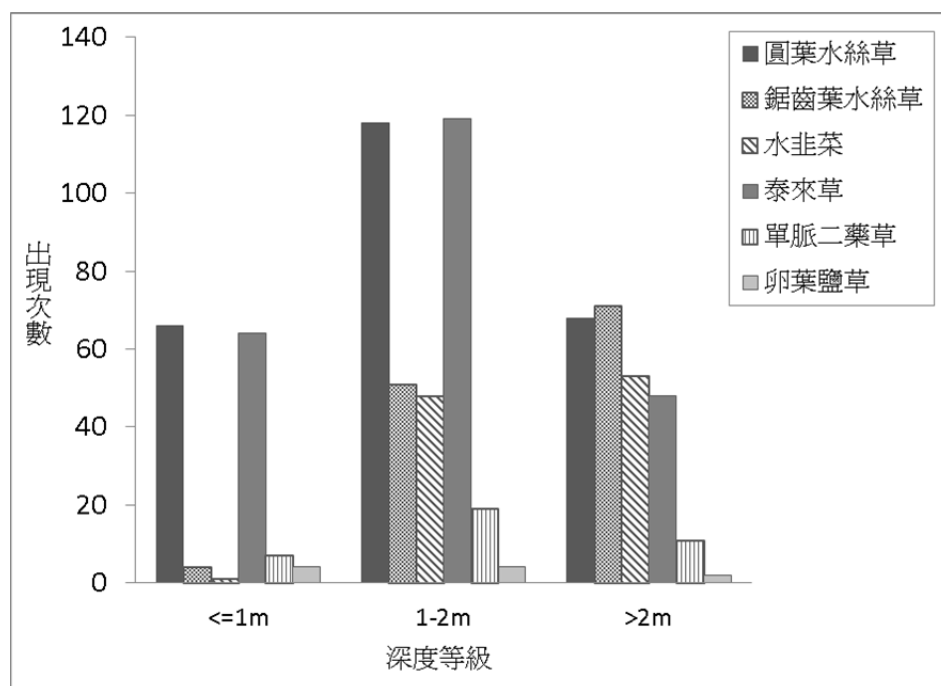


圖 14 近岸穿越線六種海草在各深度等級的出現次數

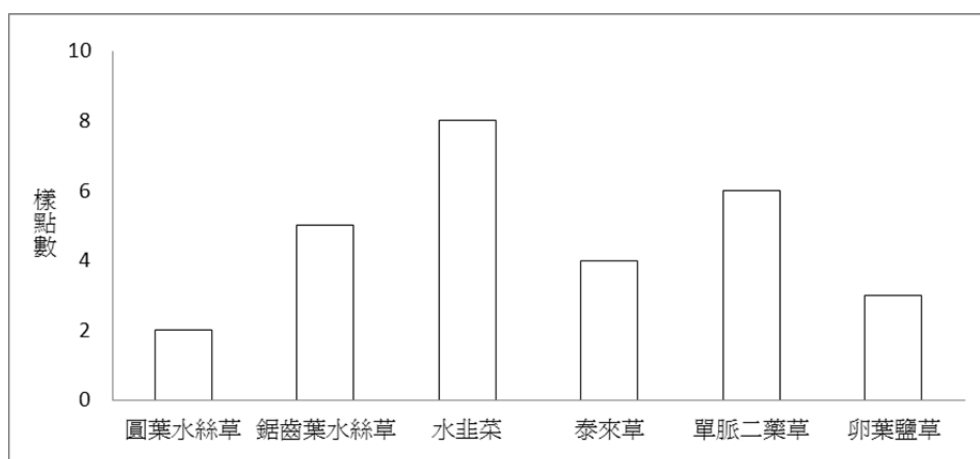


圖 15 深度大於 3 公尺的船潛樣點中，六種海草的出現頻度

4. 討論

大部分熱帶地區的海草種類，多在水深小於 10 公尺的區域被觀察到，除了是自營所需的太陽光會隨著水深的增加而衰退，過大的水壓也會抑制植株的光合作用；而低潮時的曝曬、陸域淡水的衝擊、波浪運動與其造成的混濁現象，則會限制海草種類的分布 (Short *et al.*, 2007)。由於不同地區因水質的差異，會有不同的光衰退係數，各地區海草的水深分布便會有所不同，因此探討海草在不同地

區對各種水深值的反應是必要的。

本研究以浮潛與船潛方式，針對東沙島周圍海域之海草床進行現場調查，並利用測深光達資料探討海草分布與水深之關係。根據本研究的調查結果，東沙島周圍自潮間帶到相對深度 6.8 公尺的樣點皆有海草分布，各區域都有海草覆蓋度為 70% 以上的樣點，距離岸邊 2.5 公里處亦可調查到覆蓋度為 90% 的海草床，混生情形從單種到四、五種海草不等，最常見兩種海草共存，深度在 1 到 3 公尺處可同時觀察到最多種海草，1 公尺內則多為單種或兩

種海草混生。在近岸樣點中，海草出現的比例為 93%，海草床的平均覆蓋度為 60%，以 50 到 80% 的頻度最高，而船潛樣點的海草出現比例為 70%，海草床的平均覆蓋度為 31%。本研究結果與海管處 2010 年執行的「東沙海域大型藻類生物量與海草物候、生產力調查」（林幸助等，2010）相較，該計畫的調查樣線大多沿岸設置，樣區離岸近、深度淺，如其北岸與南岸樣區的平均水深分別為 87 公分與 137 公分，所以海草覆蓋度在各區域的平均皆達 75% 以上；而本研究的調查樣點在測深光達量測期間的水深中位數為 1.4 公尺，近岸浮潛樣點遍布東沙島周圍離岸 300 到 400 公尺以內的區域，離岸的船潛資料最深則可達 7.5 公尺。此外，在海草種類與水深的關係上，鋸齒葉水絲草與水韭菜的水深分布有顯著大於其他種類的趨勢，可說明部分海草群落因子在水深與地理上的分布情形。

東沙島周圍雖為開放性海域但地勢平緩，大部分近岸海草床的水深並不適合以移動迅速的船隻作為代步工具，因此本研究在各地區的近岸海域，設計每次下水的穿越線路徑，利於浮潛游移的調查人員在每次有限的作業時間內，取得最廣的海草床資料。但東沙島周圍海域亦有很大部分的海草床離岸甚遠，需要有船隻才能到達並進行潛水調查。為進一步了解東沙島海草床的整體資訊，本研究仍選擇在有船隻可使用的時機，對水深較深的區域進行調查；但由於潛水人員不能在同一天內下潛多次，因此船潛樣點的數量較近岸穿越線樣點減少許多，不過仍對離岸海草床資訊的了解有些許幫助。而鑒於調查方法的不同，本研究將近岸穿越線與離岸船潛處的調查結果分開展示，並在海草因子與深度關係的探討上，僅選擇針對調查較完整的近岸樣點進行分析。

針對近岸穿越線樣點進行分析的結果顯示，在群落特徵上，深度在 1 公尺內的海草床大多為單種或兩種海草組成，而在物種組成上，泰來草與圓葉水絲草的深度分布顯著較鋸齒葉水絲草與水韭菜為淺，深度在 1 公尺內的樣點亦為圓葉水絲草與泰來草的出現頻度最高，指出東沙島周圍極淺處大多為圓葉水絲草與泰來草所佔據，可說明西岸除了礁

台區，幾乎為圓葉水絲草與泰來草共組的海草床，以單種或兩種混生的方式存在（圖 10 A 與 D）；而鋸齒葉水絲草與水韭菜較集中分布於 2 公尺處，所以東沙島周圍深度在 2 公尺上下會有最多的海草種數，使得北岸與南岸的物種多樣性較高，西岸與潟湖的海草種數少且變異最小（圖 4）。

雖然本研究在海草因子與深度關係的探討上，由於調查方法的緣故，主要只針對深度落於 3.6 公尺以內的近岸樣點做分析，但本研究觀察到，不論是近岸穿越線或船潛處，深度大於 3 公尺的海草出現頻度皆降低至 60% 以下，覆蓋度亦有變異較大且平均較小的趨勢；同時，在深度大於 3 公尺的船潛樣點，六種海草出現的相對頻度與近岸穿越線資料有所差異，如單脈二藥草在大於 3 公尺深的船潛樣點有較高的相對頻度，在深度為 4 公尺以上的南方船潛處有不少分布點（圖 10 E），與水韭菜和鋸齒葉水絲草的深度分布有差異較小的趨勢。因此，未來應可利用已知的深度資料，再針對 3 公尺深以上的樣點進行較完整的調查，繼續探討各項海草因子在不同深度等級的變化趨勢。

本研究近岸調查點的海草覆蓋度在 1 到 2 公尺與 2 公尺以上的兩個深度等級間無顯著差異，意即無法從深度等級間的比較，了解東沙島南側近岸調查點的覆蓋度為何與西岸和北岸有不同的特徵（圖 5），僅能由等深線的密度推測可能是該處地形起伏較大所造成；而從地圖中觀察可發現，雖然海草在南方等深線 5 公尺處仍有覆蓋度甚高的海草床，但自東沙島東側海域往北，從 3 公尺的等深線開始便鮮少觀察到海草，推測是由於北航道洋流較南航道強勁（陳陽益，2008），使得海草無法固著於基質上生長，所以限制了海草有無的分布，而水深與地形影響的主要是海草床的多樣性；此外，本研究在分析時額外發現，水韭菜的離岸距離不只大於深度分布較淺的圓葉水絲草與泰來草，也顯著地大於深度分布最為相似的鋸齒葉水絲草，這些現象的原因皆需待進一步的證實。而東沙時常為南海海域颱風的必經之處，比較 2003 年以來的衛星影像，可發現 2006 年 5 月 20 號的珍珠颱風過境後，東沙島南方船潛處疑似為海草分布的地點有稀釋與縮減的

現象，一直到現今仍無完全恢復。有鑑於海草對環境是如此敏感，持續以點位方式對東沙島周圍海草床進行調查與間測是必須的基本工作，未來若能建置完整的東沙島周圍環境因子資料庫，在了解各項環境介量（parameter）與海草因子之間的關係後，未來即可透過分布預測模式推估整個環礁的海草分布情形，同時也可透過遙測影像對海草床的辨識度，以遙測方式取得海草分布的資訊，一起解決環礁不易到達的問題。

自 2008 年以來，本研究皆無在野外狀況看到鐮葉叢草的群落，唯在沙灘上曾觀察到被海水沖上來的植株，因此鐮葉叢草於東沙海域的出現與分布情形仍有待商榷；此外，卵葉鹽草與其他海草混生的情形並不比其他種類之間頻繁，大多是單獨存在，有混生的地點通常都位於海草床的邊緣（柯智仁，2004），在覆蓋度高的海草床中並無紀錄（本研究），但其於本研究各區與各個深度等級中皆有分布，過去亦有文獻指出喜鹽草屬（*Halophila*）可存在於入海口至水體清澈的深海，最深的紀錄可達 35 公尺（Short *et al.*, 2007），故推測是卵葉鹽草的葉片外型與其他線葉型海草差異較大、植株較為短小，在適宜其他海草生長的淺海地區與他種混生的狀況下較無法競爭取得足夠的陽光，所以在本研究調查範圍的資料比例較少。過去亦有文獻指出，鐮葉叢草的水深紀錄可達 20 到 30 公尺（Duarte, 1991），因此未來若有機會能對於環礁其他部份進行調查，或許可在環礁的水深處發現其他被海草拓殖的環境，甚至有機會發現鐮葉叢草。

相較於船載聲納的測深方法，測深光達取得資料的速度快，且較不受潛水處的礁石影響，具有較低的風險性（史天元等，2011），使近岸淺海域的高解析度水深資料成為可能。不論是聲納或電磁波，都可能受到海床上的生物影響，是較人工測量所不足的地方，但要以人工方式使用尺規量測大範圍的連續面資料，幾乎是不可能的任務，相對於時間與解析度上的成本效益，測深光達是淺海域甚佳的測深方式。此外，因測深光達透過橢球高值計算的水深可排除潮汐與洋流等形成不同時間點的水深差異，使水深具有固定標準值，而能進一步供長期

生態監測使用。

參考文獻

- 史天元、薛憲文、王慧蓉、陳杰宗、陳佳勳，2010。測深光達原理、現有系統與服務，地籍測量，29：44-58。
- 史天元、薛憲文、陳雅信、陳杰宗、陳佳勳，2011。澎湖與東沙環礁透水光達成果報告，「以透水光達測繪技術測製東沙地區數值地形模型工作」成果發表會，國立交通大學，新竹市。
- 林幸助、蕭淑娟，2010。東沙海域大型藻類生物量與海草物候、生產力調查成果報告，內政部營建署海洋國家公園管理處委託辦理計劃，高雄市。
- 柯智仁，2004。臺灣海草分類與分布之研究，碩士論文，國立中山大學，高雄市。
- 陳陽益，2008。東沙內環礁海域海流水深棲地調查，內政部營建署海洋國家公園管理處委託辦理計劃，高雄市。
- Beck, M. W., et al., 2001. The identification, conservation, and management of estuarine and marine nurseries for fish and invertebrates. *BioScience* 51: 633-641.
- Björk M., Short F., Mcleod, E. and Beer, S., 2008. Managing Seagrasses for Resilience to Climate Change. IUCN, Gland, Switzerland.
- Duarte, C. M. 1991. Seagrass depth limit. *Aquatic Botany* 40: 363-377.
- Duarte, C. M. and Chiscano, C. L., 1999. Seagrass biomass and production: A reassessment. *Aquatic Botany* 65: 159-174.
- Duarte, C. M., 2001. Seagrass Ecosystems. In: Levin, S. L. (ed.). *Encyclopedia of Biodiversity*, Vol. 5. Academic Press, San Diego, CA (USA).
- Green, E.P., and Short, F.T., 2003. *World Atlas of Seagrasses*. University of California Press, Berkeley, CA (USA).
- Hemminga, M. and Duarte, C. M., 2000. *Seagrass Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Hughes, A. R., Williams, S.L., Duarte, C.M., Heck Jr, K.L. and Waycott, M., 2009. Associations of concern: declining seagrasses and threatened dependent species. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7: 242-246.
- Koch, E., Ackerman, J., Verduin, J. and Keulen, M., 2006. Fluid Dynamics in Seagrass Ecology—from Molecules to Ecosystems. In: Larkum, A. W. D., Orth, R. J., Duarte, C. M. (ed.)

- Seagrasses: Biology, Ecology, and Conservation. Springer, Dordrecht, the Netherlands.
- Lin, H.J., Hsieh, L.Y. and Liu, P.J., 2005. Seagrasses of Tongsha Island, with descriptions of four new records to Taiwan. *Botanical Bulletin of Academia Sinica* 46: 163-168.
- Marbá, N., Holmer, M., Gacia, E. and Barrón, C., 2006. Seagrass Beds and Coastal Biogeochemistry. In: Larkum, A. W. D., Orth, R. J., Duarte, C. M. (ed.) *Seagrasses: Biology, Ecology, and Conservation*. Springer, Dordrecht, the Netherlands.
- Orth, R. J., Carruthers, T. J. B., Dennison, W. C., Duarte, C. M., Fourqurean, J. W., et al., 2006. A global crisis for seagrass ecosystems. *BioScience* 56: 987-996.
- Short, F. T. and Wyllie-Echeverria, S., 1996. Natural and humaninduced disturbance of seagrasses. *Environmental Conservation* 23: 17-27.
- Short, F. T., Coles, R. G. and Pergent-Martini, C., 2001. Global Seagrass Distribution. In: Short, F. T., Cotes, R. G. (ed.) *Global Seagrass Research Methods*. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.
- Short, F., Carruthers, T., Dennison, W. and Waycott, M., 2007. Global seagrass distribution and diversity: A bioregional model. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 350: 3-20.
- Spalding, M., Taylor, M., Ravilious, C., Short, F. and Green, E., 2003. Global Overview: The Distribution and Status of Seagrasses. In: Green, E. P., Short, F. T. (ed.) *World Atlas of Seagrasses: Present Status and Future Conservation*. University of California Press, Berkeley, CA (USA).

Distributional Characteristics of the Seagrasses Encircling the Dongsha Island

Hsiao-Yun Sun ¹ Chia-Ying Ko ² Pei-Fen Lee ^{3*}

ABSTRACT

Seagrasses are as important indicator of water quality and pollution in the shallow-ocean zone and extracts from seagrasses can be used widely, leading them to a high value on both ecology and economy. Dongsha Island, surrounded by abundant seagrass meadow and composed of at least six species accounted for 10% of the world, is a main habitat for seagrasses in Asia. We combined field data of the seagrasses with environmental factors derived from LiDAR around the Dongsha Island to understand distributional characteristics of the seagrasses and to compare effects of water depth on seagrasses' distributions. Our results indicated that, seagrasses were found in the depth of 0 to 6.8m, with the coexistence of 1 to 5 species. The highest number of seagrass species was coexisted in the depth of 1 to 3m while single or two seagrass species were often observed within depth of 1m. In the depth within 3m, the seagrass bed had the highest occurrence frequency, up to 93%, where the most sites had the leaf cover within 50% to 80%. We also found that the seagrasses *Cymodocea rotundata* and *Thalassia hemprichii* occupied the depths less than *Cymodocea serrulata* and *Syringodium isoetifolium*. Overall, the seagrasses encircled the Dongsha Island show specific preference, and their distributional characteristics and coexistence are affected most by water depth. The environmental data derived from LiDAR can be further useful on species distributions and ecological monitoring.

Keywords: Dongsha Island, seagrass, LiDAR, distribution

¹ Graduate student, Institution of Ecology and Evolutionary Biology,
National Taiwan University

² Postdoctoral associate, Institution of Ecology and Evolutionary Biology
National Taiwan University

³ Professor, Institution of Ecology and Evolutionary Biology, National Taiwan University

* Corresponding Author, Phone: 886-2- 33662469, E-mail: leepf@ntu.edu.tw

Received Date: Jun. 30, 2011

Revised Date: Aug. 29, 2011

Accepted Date: Oct. 18, 2011

空載測深光達於毛細波及重力波水面偵測之初探

趙鍵哲^{1*} 孟稚開²

摘要

空載測深光達因其具備安全性與高效能的作業方式，使其成為執行淺海潮間帶三維地形圖資測繪有利的工具。然由於水體與水底材質分屬性質不同的介質體及反射體，為獲得正確的水底地形，須先掌握測深光達的正確雷射脈衝往返行經路徑，並從波形分析中分別偵測雷射脈衝碰觸水面及水底之時間點，此兩時間觀測量結合定位定向資料精度攸關水底三維地形測繪品質甚鉅。然而現階段對於水面模型幾何以及偵測水面時間點之相關研究仍顯薄弱，直接影響水底地形測繪品質的不確定性。本研究主要工作在瞭解及分析單一雷射脈衝至水面之交互作用；在水面模型方面考量水面局部變異顯著的毛細波及重力波。除了藉由改變系統掃描幾何與風速探討對水面回波波形在幾何與能量上之影響以外，亦歸結在不同系統掃描幾何及風速因素下較合宜且準確的波形時間偵測法。結果顯示中高風速下，以 50% 上升時間演算法為較佳偵測方式；而於低風速下，以較低掃描角可獲取較明顯起伏之能量值。

關鍵詞：空載測深光達、波形、毛細波及重力波、時間偵測法

1. 前言

因應國防及民生用途，近年來政府相關部門陸續推展臺灣近海、澎湖及東沙等地區近海及潮間帶三維海底地形圖資測繪工作。船載聲納系統雖為海底地形測繪之常用感測器，然而在潮間帶以內至近岸之淺水海域及潮間帶地區作業易面臨觸礁危險。相對而言，空載測深光達系統(Airborne LiDAR Bathymetry Systems)於上述海域進行三維海底地形測繪能展現較高之施測安全性及較佳之作業效能。

圖 1 顯示空載測深光達與船載聲納之施測場景，在水深較淺處，執行聲納探測之船隻易有碰觸礁石之危險；此外，由於聲納之系統設計，其帶寬(swath width)在淺水區域較小，如要完成圖中水域的施測將會耗費相對高的時間以及成本；空載測深光達系統於此情況下則無觸礁情事，此外，其掃描帶寬較大，可大幅縮短施測時間。

圖 2 為空載測深光達取單一雷射脈衝(laser

pulse)之路徑示意圖，紅色箭頭代表此單一脈衝，綠色虛線則是接收器的視場角(Field of view, FOV)，雷射脈衝在碰觸水面時經由反射(reflection)作用會有訊號回傳；而進入水中的雷射脈衝，視水中介質環境可能產生散射(scattering)、吸收(absorption)等複雜及多樣作用。

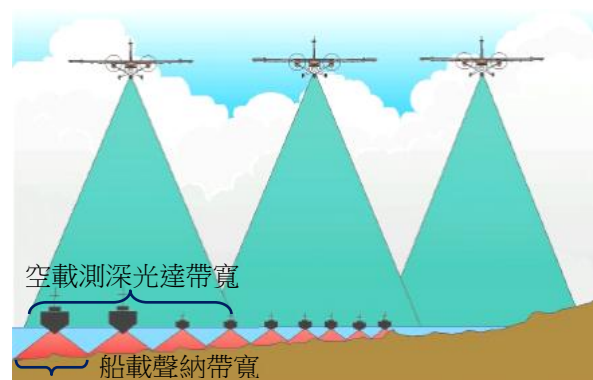


圖 1 空載測深光達和船載聲納施測示意
(修改自 Guenther et al., 2000)

¹ 國立臺灣大學土木工程學系副教授

² 國立臺灣大學土木工程學系 碩士

*通訊作者，電話：02-23678645, E-mail: jejaw@ntu.edu.tw

收到日期：民國 101 年 03 月 05 日
修改日期：民國 101 年 06 月 13 日
接受日期：民國 101 年 07 月 24 日

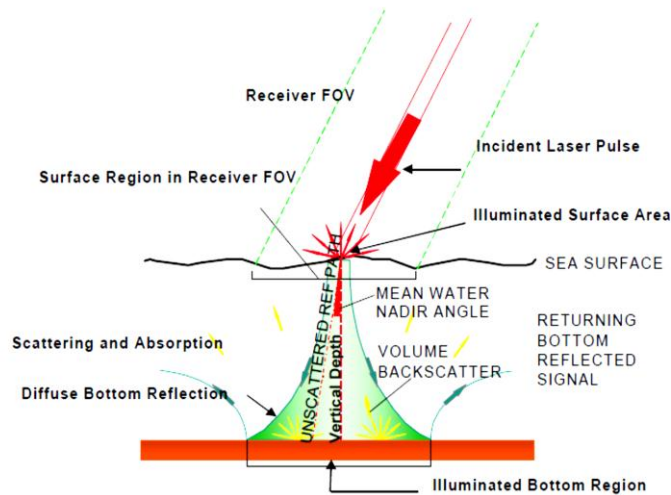


圖 2 空載測深光達脈衝行徑示意圖 (LaRocque and West, 1999)

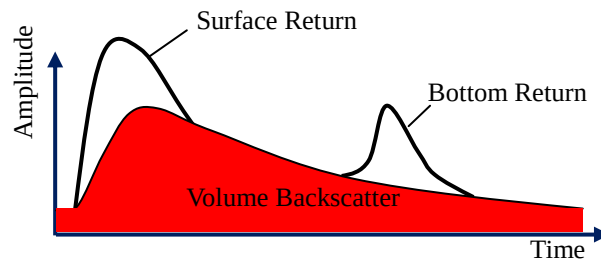


圖 3 空載測深光達回訊波形 (修改自 Guenther *et al.*, 2000)

就學理而言，空載測深光達之回訊(echo)包含三部分：水面回訊、水體回訊以及水底回訊，然由於水體與水底材質分屬性質不同的介質體及反射體，為獲得正確的水底地形，需先掌握空載測深光達的正確雷射脈衝往返行經路徑(traveling path)，並從波形分析中分別偵測碰觸水面及水底之時間點(如圖 3 所示)，此兩時間觀測量精度攸關水底三維地形測繪品質，其中，脈衝碰觸水面之時間點將會影響水面偵測結果以及水中斜距之計算，影響甚鉅不可小覷。

儘管雷射脈衝在水中有複雜及多樣的幾何及輻射作用，但已有若干研究提出合適或近似之處理機制以為因應。相對而言，現階段對於水面的模型幾何以及偵測水面時間點相關研究卻仍稀少，為瞭解水面回訊之機制及獲致較準確時間點之偵測效果，本研究建立一個基於風速擾動(wind-induced)的毛細波及重力及風速擾動的重力波，合稱毛細波-重力波(capillary-gravity wave)

水面模型，此水面模型將隨著風速大小而改變其波浪起伏，藉由模擬發射空載測深光達單一雷射脈衝，以光線幾何路徑追蹤其與水面進行交互作用。並依據單一雷射脈衝與水面之交互作用，在調制風速及掃描幾何變因下，觀察回波(相應於圖 3 標示“Surface Return”之波形)特性及歸結時間偵測法的距離量測品質。

2. 研究方法

為了模擬空載測深光達雷射脈衝發射器及水面幾何，本研究以蒙地卡羅法(Monte Carlo method)來產生每顆光子(photon)的發射模擬及對應之水面模型。光子到達水面時會和毛細波以及重力波組成的表面接觸，其路徑依據司奈爾定律(Snell's Law)計算，並以光線追蹤演算法來進行雷射光子在水面之可能多重反射路徑。而每一次光子與水面接觸，其能量的傳遞耗損則依照菲涅爾

反射率(Fresnel reflectance)計算,獲致返回接收器之回訊的波形能量圖,並藉由波形的時間偵測演算法求得脈衝接觸水面之時間點。以下分別介紹水面模型、蒙地卡羅法、光學交互作用、光線追蹤法以及時間偵測演算法。

2.1 水面模型

2.1.1 海水運動

海水運動的主要現象有:(1).海流、(2).潮汐、(3).波浪。其中海流主要成因為外力,包括地球自轉偏向力(科氏力)、日月萬有引力、大氣中之行星風系、地方區域性風系、海水中密度的差異、及海與陸地相接部分地形的影響;潮汐為海平面週期性地起伏變化,其原因若和天體相互位置有關,稱為天文潮(Astronomical tide),若和氣象作用引起之水位變化有關則稱為氣象潮(Meteorological tide)或暴潮(Storm surge);而波浪主要受到風影響,主要為毛細波以及重力波,前者週期較短,後者週期較長,前者主要受到海水的表面張力所影響,後者則受到重力影響較多(朱佳仁, 2011)。

基於上述,海水運動可有尺度大小不同的起伏及週期。然而,空載測深光達之雷射脈衝與水面碰觸之交互作用為局部性作用,小區塊之水面起伏變化是水面回訊之關鍵考量,並不需考量洋流及潮汐等作用。基於此,本研究遂行以風場所形成的毛細波以及重力波作為水面模型(Mobley, 2002; Tuldahl and Steinvall, 2004)。

2.1.2 毛細波及重力波表面

依據 Mobley(2002),毛細波表面之特色可依如下設想:想像一個表面,因為風吹動的緣故會改變瞬間波面的法向量,其表面高程 η 會有變化,產生水面起伏,如圖 4 所示。

圖 4 中,假設水面表面由六角形網格(hexagonal grid)所組成,而六角形的基本元素為

大小一致的等腰三角形(如圖 4 右上角,亦稱 triad),在此表面模式下之每個毛細波節點其表面高程起伏之隨機量值 η 為式(1)所示:

$$\eta = \delta \left(\frac{a_u}{2} U \right)^{1/2} \quad (1)$$

其中, δ 為等腰三角形底邊長, $a_u = 3.16 \times 10^{-3} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 為一經驗係數, U 為風速,單位為 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此式若模擬 δ 為 1 公分之尺寸,在風速為 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之情形下,毛細波高程隨機量值約 0.2 公分,從幾何上來評析,以等腰三角形等邊為基準,其表面受風場影響產生 20% 傾斜變化。

圖 4 中, $\overrightarrow{AB}$ 為一道入射雷射光子向量,這時會在 B 點接觸到由式(1)所建構之毛細波水面,隨即因反射而變更為向量 $\overrightarrow{BC}$ 。而向量 $\overrightarrow{BC}$ 是否會再接觸鄰近表面則須視光子向量與表面幾何而定,此部分可藉由光線追蹤演算法來確認其行徑。依照圖 4 所演示,向量 $\overrightarrow{BC}$ 確實碰觸到第二塊毛細波水面並產生反射向量 $\overrightarrow{CE}$ 後才離開六角形範圍。

相對於毛細波而言,重力波週期較大,其主要節點高程起伏為風速(U)以及重力(g)變數之函式,簡易圖示如圖 5,其中虛線所圍三角形及最外圍之六角形對應於圖 4 毛細波基本之相應單元。

重力波表面其基本處理單元 $2X \times 2Y$,並且定義 X 軸方向為風的行徑方向。而 $2X$ 及 $2Y$ 分別切成 $2l$ 和 $2m$ 等分,每一等分間隔分別為 $\Delta x = X / l$ 以及 $\Delta y = Y / m$,並產生相應節點 (i, j) ,其中 $-\ell \leq i \leq \ell$, $-m \leq j \leq m$ 。

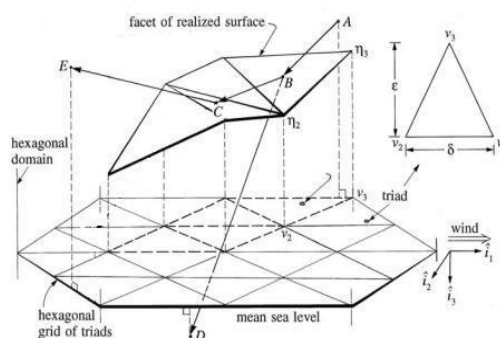


圖 4 毛細波隨機表面示意圖(Mobley, 2002)

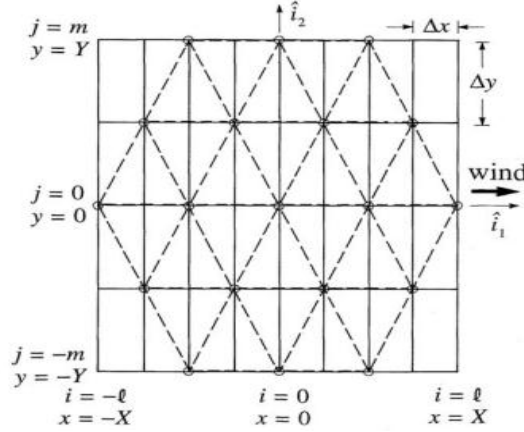


圖 5 重力波表面示意圖 (Mobley, 2002)

而第 w 個節點之高程起伏隨機量值可由式(2)計算而得：

$$\eta(i, j; w) = \sum_{(u,v) \in w} \left[b_{uv}(w) \cos 2\pi \left(\frac{ui}{p} + \frac{vj}{q} \right) + c_{uv}(w) \sin 2\pi \left(\frac{ui}{p} + \frac{vj}{q} \right) \right] \quad (2)$$

其中

b_{uv} 及 c_{uv} 為獨立之隨機變量，具常態分布特性，平均值為 0，而變方(variance)為式(3)所示：

$$E \{ b_{uv}^2 \} = E \{ c_{uv}^2 \} = E(k_u, k_v) \Delta u \Delta v \quad (3)$$

$(u, v) \in w$,

$u = 0$ and $1 \leq v \leq m$ or $1 \leq u \leq l$ and $-m \leq v \leq m$; $p = 2l + 1$ and $q = 2m + 1$,

$$\Delta u = \frac{2\pi}{p\Delta x}, \Delta v = \frac{2\pi}{q\Delta y}, k_u = u\Delta u, k_v = v\Delta v,$$

而 $E(k_u, k_v)$ 是波的方向能量光譜(Directional energy spectrum of the waves)，可由式(4)計算：

$$E(k_u, k_v) = F(\sigma_{uv}, \phi_{uv}) \frac{g^2}{2\sigma_{uv}^3} \quad (\text{m}^4) \quad (4)$$

其中

$$\sigma_{uv} = (gk_{uv})^{1/2} \quad (\text{s}^{-1}), \quad \phi_{uv} = \tan^{-1} \left(\frac{k_v}{k_u} \right), \quad k_{uv} = (k_u^2 + k_v^2)^{1/2} \quad (\text{m}^{-1}),$$

$$F(\sigma_{uv}, \phi_{uv}) = C\sigma_{uv}^{-6} \exp \left[-2 \left(\frac{g}{\sigma_{uv} U} \right)^2 \right] f(\sigma_{uv}, \phi_{uv}),$$

$$f(\sigma_{uv}, \phi_{uv}) = 1 + (0.50 + 0.82\xi) \cos(2\phi_{uv}) + 0.32\xi \cos(4\phi_{uv}),$$

$$\xi = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{uv} U}{g} \right)^4 \right],$$

$$C = 0.763 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-5}, \quad g = 9.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

前述公式(1)~(4)及參數參自 Mobley(2002)，從以上公式推演得知，一旦給定風速(U , 以 m/s 為單位)計算出 $E(k_u, k_v) \Delta u \Delta v$ (式(4))，便可利用式(3)解算 $b_{uv}(w)$ 和 $c_{uv}(w)$ 之變方，當給予重力波基本尺寸後，可產生重力波表面，並依式(2)計算重力波節點高程起伏隨機量值。

在毛細波及重力波兩種效應上，低風速時，水面起伏主要由毛細波現象支配；高風速及吹風歷時較長時，則為重力波主宰水面起伏(Mobley, 2002)。合成之毛細波與重力波受風速及重力影響的水面起伏可藉由式(1)~(4)來估計。

雖然式(4)為水面作用較早期之應用公式(Mobley, 2002)，然對於本研究主要探究在風速、重力及掃描角影響下的相對波形分析工作應是能滿足的。

2.2 蒙地卡羅法

「蒙地卡羅法」是一種產生任何分配隨機變數(Random Variables)之方法(Law and Kelton, 1991)，理論上是根據齊一分布(Uniform Distribution)之特性於 0 和 1 之間產生隨機亂數(random numbers)，再將此隨機亂數透過特定數學方法轉換成符合其他分布的隨機變數。本研究工作藉由蒙地卡羅法來進行大量雷射脈衝之光子發射(發射圓盤及光子模擬詳參 3.2 及 3.3 節)及毛細波-重力波水面模型資料生成，並據以計算幾何路徑及能量傳遞之波形平均值。

2.3 光學交互作用

2.3.1 折射及反射

在雷射光子與水面的光學交互作用，本工作中牽涉者主要為折射及反射作用，如圖 6 所示。

其中， $\hat{\xi}_i$ 為入射光線向量， $\hat{n}$ 為接觸面的法向量， $\hat{\xi}_r$ 為反射光線向量， $\hat{\xi}_t$ 為折射光線向量， n_a 為空氣中折射係數， n_w 為水的折射係數， θ' 為入射角， θ_r 為反射角， θ_t 為折射角。

折射現象依循司奈爾定律，可藉由式(5)計算折射角

$$\sin \theta' = n_w \sin \theta_t \quad (5)$$

而反射光線向量可藉由式(6)求得：

$$\hat{\xi}_r = \hat{\xi}_i - 2(\hat{\xi}_i \cdot \hat{n})\hat{n} \quad (6)$$

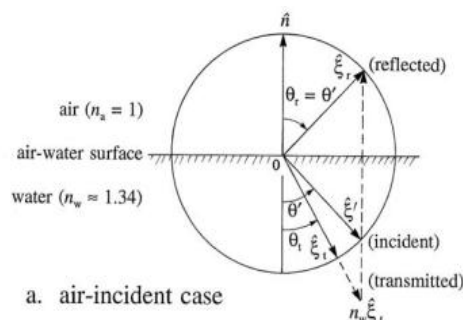


圖 6 自空氣入射水中的光線行徑示意圖
(Mobley, 2002)

2.3.2 菲涅爾反射率

菲涅爾反射率用來計算光子在水面反射後之剩餘能量比率，可藉由式(7)計算，其數值介於 0 與 1 之間。當反射次數越多(即多次反射，肇因於局部高低起伏之毛細波及重力波表面)，能量消褪越多。

2.4 光線追蹤演算法

光線追蹤施作包括決定雷射脈衝與水面碰觸點、光子在水面模型之路徑傳播以及回返接收器光子時間、數量及能量。幾何路徑為追蹤光子在毛細波-重力波水面之軌跡；能量則依據前述路徑搭配菲涅爾反射率求算(孟稚開，2011)。

2.5 波形時間偵測演算法

回波波形之時間偵測可藉由斜率變化極大值法(Maximum slope)、面積中點法(Center of area, COA)、平均值法(Mean)、峰值法(Peak)、中值法(Midpoint)以及 50% 上升時間法(50% Risetime Point)等方法進行，各方法示意如圖 7。

斜率變化極大值乃依據波形，尋找正向斜率變化的極大值所對應的時間點；面積中點法所對應的時間點為大於某一門檻值以上的波形圖所包含的面積均分點；平均值法是求波形質心對應之

時間點；峰值法乃利用二次方程式擬合求最高能量對應之時間點；中值法取高於門檻值的連續波形內之時間中值；50%上升時間法以斜率上升波

形，取其上升時間的中間，亦即 50% 的上升時間點。

$$r(\theta') \equiv r(\hat{\xi}', \hat{n}) = \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{\sin(\theta' - \theta_t)}{\sin(\theta' + \theta_t)} \right]^2 + \left[\frac{\tan(\theta' - \theta_t)}{\tan(\theta' + \theta_t)} \right]^2 \right\} \quad (7)$$

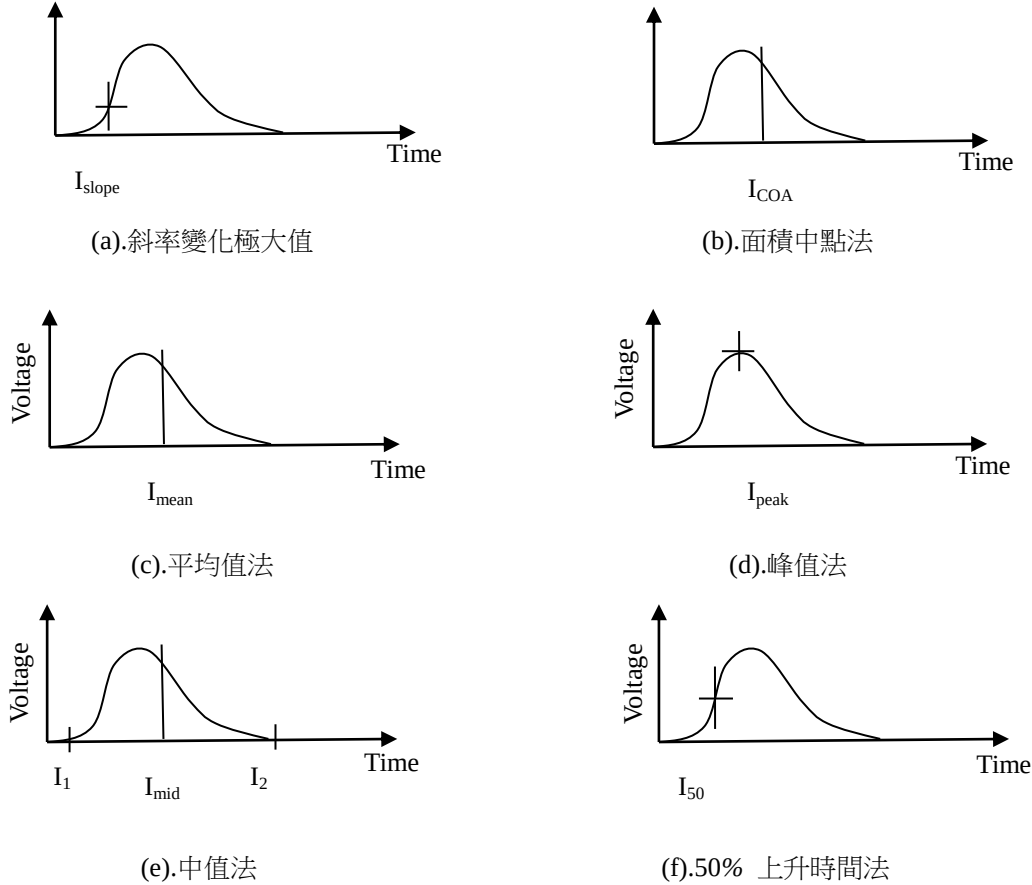


圖 7 波形時間偵測法(修改自 Abshire *et al.*, 1994)

3. 實驗配置

為了能夠模擬雷射脈衝光子與水面的交互作用，在實驗配置方面，先依據風速建立水面模型，再依據空載測深光達發射點和此初始水面建立相對關係，並以蒙地卡羅法進行光子發射及水面模型之幾何及輻射交互作用，獲致波形趨勢。另外，本研究實驗配置所謂「掃描角」乃指雷射發射向量與鉛垂方向之夾角(亦稱 off-nadir angle)。

3.1 波形實驗配置

依據現行作業中空載測深光達系統，雷射脈衝產生器相關之參數配置如表 1。

3.2 發射器圓盤及雷射光子

雷射之發射器圓盤如圖 8 所示，光子發射的位置由 ρ_s 以及 θ_s 決定，現在假設發射器圓盤上之能量分布為一致，所以面積 A_s 和 A_l 的比例應該是常數，如式(8)所示：

$$\frac{A_s}{A_l} = \frac{\pi \rho_s^2}{\pi \rho_l^2} = \Lambda_1 \quad (8)$$

其中 Λ_1 為一滿足齊一分布之隨機變數，經過

移項整理後可得到式(9)。

$$\rho_s = \rho_l \sqrt{\Lambda_1} \quad (9)$$

而 θ_s 可藉由式(10)決定。

$$\theta_s = 2\pi\Lambda_2 \quad (10)$$

其中 Λ_2 亦為滿足齊一分布之隨機變數，而與 Λ_1 是互相獨立的。

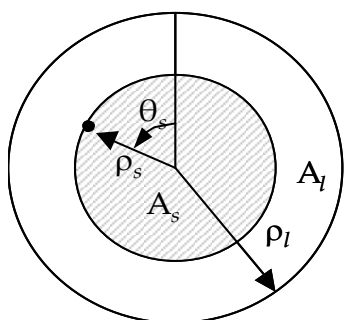


圖 8 發射器之圓盤示意圖 (Wang, 2005)

表 1 雷射脈衝產生器配置

能量(mjoule)	5
光子個數	1000000
脈衝寬度(ns)	7
脈衝解析度(ns)	0.01
波長(nm)	532
航高(m)	400
發射器直徑(mm)	100
發射器 FOV(mili-radian)	5
接收器直徑(mm)	100
接收器 FOV(mili-radian)	21
掃描角(degree)	20

3.3 雷射光子發射方向

光子發射方向的示意圖如圖 9 所示，現在假設光子的密度在發射器之口徑上是一致的，那麼由 θ_a 所產生的半球，其面積應正比於由 $FOV/2$ 所產生的半球，如式(11)所示。

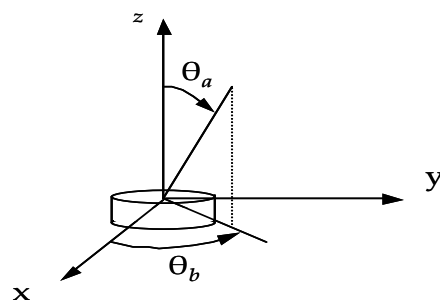


圖 9 光子發射方向之示意圖 (Wang, 2005)

$$\frac{2\pi \int_0^{\theta_a} \sin \theta d\theta}{2\pi \int_0^{FOV/2} \sin \theta d\theta} = \Lambda_3 \quad (11)$$

經過整理後可得光子發射之俯仰角 θ_a 如式

(12)所示：

$$\theta_a = \arccos \left[1 + \Lambda_3 \left(\cos \left(\frac{FOV}{2} \right) - 1 \right) \right] \quad (12)$$

而方位角 θ_b 之則由式(13)決定。

$$\theta_b = 2\pi\Lambda_4 \quad (13)$$

3.4 風速配置

以微風(5m/s)、清風(10m/s)和大風(20m/s)為配置依據(中央氣象局，2011)。圖 10、11 及 12 分別為 5m/s、10m/s 及 20m/s 風速下之水面表面起伏示意。以下實驗亦稱 5m/s、10m/s 及 20m/s 風速為低、中及高風速。所配置之水面模型等腰三角形之底邊長為 0.5 公分，圖中以不同顏色線段突顯水面模型上之不同三角形。

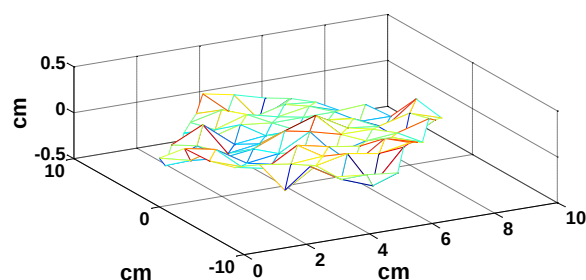


圖 10 低風速(5m/s)狀態下之毛細波-重力波水面起伏(unit: cm)

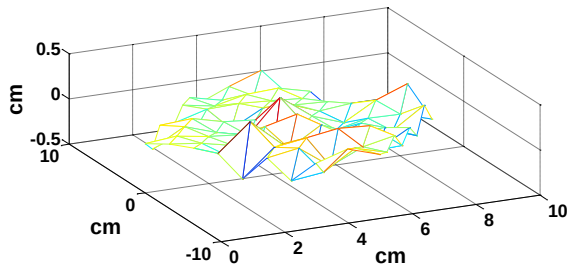


圖 11 中風速(10m/s)狀態下之
毛細波-重力波水面起伏(unit: cm)

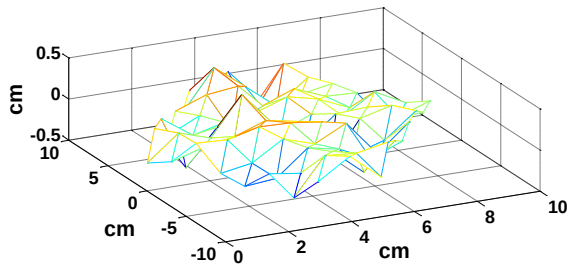


圖 12 高風速(20m/s)狀態下之
毛細波-重力波水面起伏(unit: cm)

由圖 10 至圖 12 可得知在低風速下，毛細波-重力波水面模型振幅約為 0.1 公分左右(相對於等腰三角形底邊之傾斜約 20%)，在風速加至 10m/s 以及 20m/s 時，水面起伏漸次增大，最大振幅約 0.3 公分(相對於等腰三角形底邊之傾斜約 60%)。

4. 實驗結果

4.1 風速對於波形變化以及時間偵測上之影響

在航高 400 公尺以及掃描角 20 度情況下，依 5m/s、10m/s 及 20m/s 之風速所產生之水面起伏之光子回波波形如圖 13 所示，能量極大值的出現時間點為接近 2.84×10^{-6} 秒，變化風速所擾動之水面起伏雖不同，但在蒙地卡羅法實驗資料統計下顯示：回訊之光子大部份行經一次反射。

而針對在不同風速下之回波波形，不同之時間偵測演算法呈現如下之品質差異：低風速下，以斜率變化極大值法較能偵測到準確之距離量，在中、高風速時則以 50% 上升時間偵測法有較佳的距離測量成果。而比較各種不同演算法之時

間偵測結果，在本次實驗配置下，最大的垂直距離差異值達 40 公分。時間偵測結果數據參見表 2(表中“計算之航高”代表由時間偵測反演的發射器至水面之垂直距)。

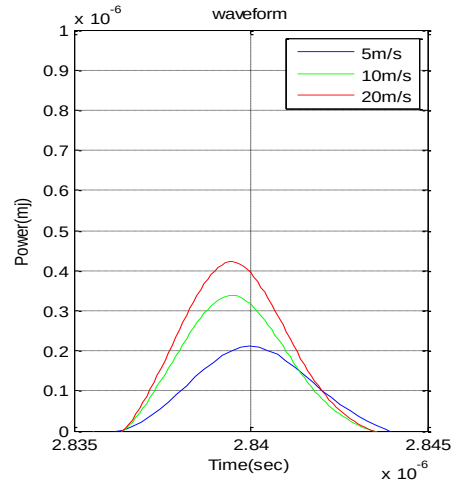


圖 13 水面起伏之光子回波波形

4.2 掃描角對於波形變化之影響

參照實務作業，考量掃描角為 10 度、15 度及 20 度之回波波形分析。實務中因考量測深精度，掃描角系統上限預設為 20 度，且會依據特定的需求更改掃描角為較小角度，但不會完全近乎垂直發射雷射脈衝，因為垂直入射易造成接收器的損壞(Guenther *et al.*, 2000)。

4.2.1 低風速

在低風速情況下，由於水面起伏輕微，當掃描角越小時，能順利一次反射回接收器的光子數較多，所以產生能量較大的波形。圖 14 中顯示掃描角為 10 度時，其回波波形能量高於掃描角為 15 度及 20 度之回波波形能量。

由實驗結果可知，在低風速(5m/s)的情況下，由於水面起伏不大，當掃描角越小時，能順利一次反射回接收器的光子數較多，所以產生能量較大的波形，當掃描角變為 10 度時，能量上升幅度最為明顯(和掃描角 15 度時差值約 0.15×10^{-6} mjoule)，以幾何圖示來表示可參考圖 15，其中橢圓為發射/接受器區域，連接此區域兩側之藍色及

紅色較粗虛線分別為高掃描角及低掃描角之視場角，細虛線表達光子自發射至與水面反射之路徑，而黑色粗體線為海面起伏側面示意。

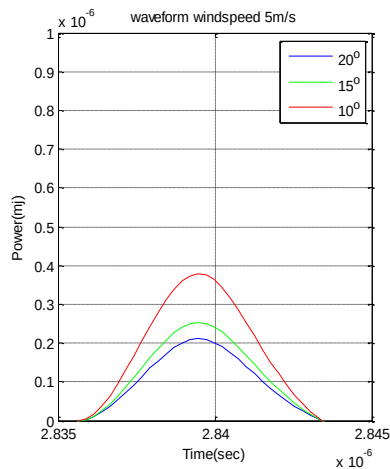


圖 14 低風速下(5m/s)改變掃描角之回波波形

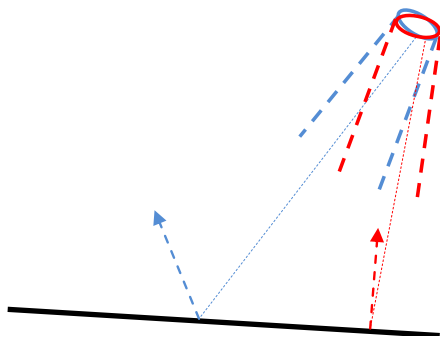


圖 15 低風速下改變掃描角之光子路徑示意圖

由圖 15 可知，自水面許多起伏小平面擇一代表光子之接觸狀況：當掃描角轉為較小時(由藍色虛線接收器變為紅色虛線接收器)，能夠回返接收器的光子機率會上升。

4.2.2 高風速

在高風速的情況下，水面起伏作用較劇，在搭配低掃描角的幾何下，能夠順利回到接收器的光子個數相對減少。

圖 16 顯示回波波形能量是隨著掃描角增加而加強，此現象與低風速下之成果恰成相反對比。在掃描角 10 度時其回波能量約為掃描角 20 度之 67%。

圖 17(線條定義同於圖 15)顯示高風速時水面

起伏較劇烈，形成較陡之波面，對於高掃描角之雷射光子提供返回接收器較好的水面反射幾何，有利於獲致較多的光子數量。

相較於低風速之水面幾何，風速加強後，水面起伏變得較劇烈，雷射光子在水面進行多次反射的機率提升，因此波形尾端會被拉長，此現象可見於圖 16 及圖 18。而在時間點偵測上以 50% 上升時間方法較不受此波形尾端拉長之影響，因此會有較佳的距離偵測品質。

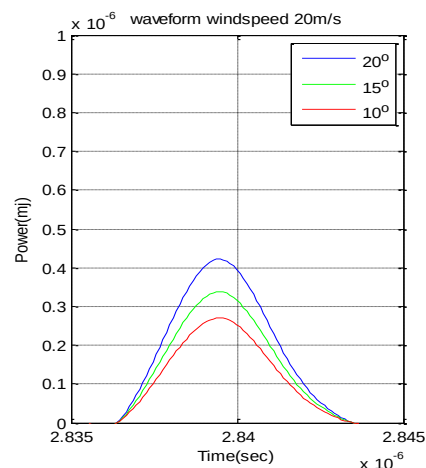


圖 16 高風速下(20m/s)改變掃描角之回波波形

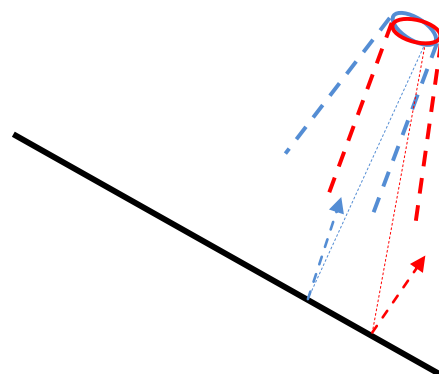


圖 17 高風速下改變掃描角之光子路徑示意圖

4.2.3 中風速

由圖 18 顯示：在 10m/s 風速實驗中，掃描角 10 度及 15 度之回波能量幾近重疊且略高於 20 度之回波能量，然而三種掃描角所產生之回波波形能量差異並不明顯。

表 2 時間偵測結果(航高:400 公尺; 掃描角:20 度)

	風速:5m/s		風速:10m/s		風速:20m/s	
偵測演算法	秒數(s) $\times 10^{-6}$	計算之航 高(m)	秒數(s) $\times 10^{-6}$	計算之航 高(m)	秒數(s) $\times 10^{-6}$	計算之航 高(m)
斜率變化極大值	2.8377	399.983	2.8377	399.980	2.8377	399.975
50%上升時間法	2.8380	400.026	2.8380	400.015	2.8380	400.008
面積中點法	2.8397	400.260	2.8397	400.259	2.8397	400.255
平均值法	2.8395	400.237	2.8395	400.233	2.8395	400.232
中值法	2.8405	400.379	2.8405	400.379	2.8405	400.379
峰值法	2.8398	400.280	2.8398	400.279	2.8398	400.277

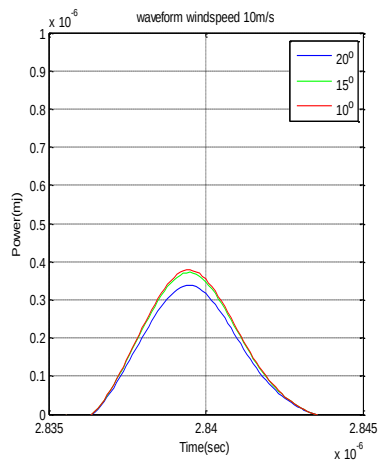


圖 18 中風速(10m/s)改變掃描角之回波波形

倘搭配低掃描角則能獲致較強的回波能量。

4. 水面、水體及水底回訊之資料處理整合為成功執行測深任務之必要條件，本研究工作之水面模型建構及回波波形分析有助於前述三分項工作之銜接。

致謝

本文若干重要修正得力於兩位審查者所提出的具體建議，在此深表謝忱。

參考文獻

- ### 5. 結論與未來工作
1. 本研究建構基於風場擾動之水面模型能據以模擬及分析雷射脈衝對水面交互作用之幾何與能量行為，有助於空載測深光達在水面回訊偵測上之現象理解及掌握較有效的波形資料處理方法。
 2. 不同的時間偵測演算法對於不同風速下偵測水面時間點的適用性亦有所不同，於低風速時，斜率變化極大值法為較佳的偵測演算法；在中、高風速時，以 50% 上升時間法表現較佳。因此如能在施測前得知當地的相關氣象資訊，即可搭配相對應較適合的時間偵測演算法，獲得較準確之水面時間點預測。
 3. 低、中風速應為實務作業中所選用的氣象條件，

中央氣象局，網址：
<http://www.cwb.gov.tw/V6/education/encyclopedia/me016.html>

(最後取得日期：2011 年 4 月 6 日)。

朱佳仁，2011，環境流體力學上課講義，網址：
http://www.cv.ncu.edu.tw/html/01_Intro/Faculty_Ch/Personal/THE01_index.htm(最後取得日期：2011 年 4 月 20 日)。

孟稚開，2011，空載測深光達於考量毛細波及重力波水面偵測之模擬與分析，國立臺灣大學土木工程學系碩士論文。

Abshire, J. M., J.F. McGarray, L.K. Pacini, J.B. Blair, and C.G. Elman, 1994. Laser Altimetry Simulator version 3.0, User's Guide, NASA Technical Memorandum 104588, 66 p.

Guenther, G. C., A. G. Cunningham, P. E. LaRocque, and D. J. Reid, 2000. Meeting the

- accuracy challenge in airborne LiDAR bathymetry, Proc. EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, 27 p.
- LaRocque, P.E., and G.R. West, 1999. Airborne Laser Hydrography: An Introduction, Proc. ROPME/PERSGA/IHB Workshop on Hydrographic Activities in the ROPME Sea area and Red Sea, 16 p.
- Law, A.M., and W.D. Kelton, 1991. Simulation Modeling and Analysis, McGraw-Hill, Inc., pp. 112-113 & 330.
- Mobley, C.D., 2002. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters, Academic Press, San Diego, CA, 592p.
- Tulldahl, H.M., and K.O.Steinval, 2004. Simulation of sea surface wave influence on small target detection with airborne laser depth sounding, APPLIED OPTICS, 43(12):2462-2483.
- Wang, C. K., 2005. Ocean bottom characterization using airborne LiDAR, Ph.D. dissertation, CORNELL UNIVERSITY, US, 97 p.

The Preliminary Study Of Airborne LiDAR Bathymetry On Capillary-Gravity Water Surface Detection

Jen-Jer Jaw ^{1*} Chih-Kai Meng ²

ABSTRACT

Airborne LiDAR Bathymetry has been proven as an ideal technique for safely and efficiently operating in both shallow water and tidal flat areas for 3-D topographic mapping tasks. Yet the crucial challenge for acquiring terrain of water bottom is to precisely capture the trajectory of laser pulse when travelling between different medium, in the air, water and at the water bottom. Therefore, the quality of mapping 3-D bottom terrain would depend on how well the waveform analysis on determining the timing hitting water surface and water bottom can be designated. The goal of this research is to focus on comprehending the reaction of laser pulse on water surface, mainly wind-induced capillary-gravity wave facets. In particular, laser scanning geometry and the wind factor that shape the waveform geometrically and radiometrically are analyzed and thus the better timing detection method can be advised. It is suggested that adopting 50% risetime point, among others, would render better timing detection results when operating under moderate to strong wind speeds. In addition, when provided with gentle wind speed, bathymetry scanned in a lower off-nadir angle would gain richer energy.

Through this study, better understanding of laser-to-water interaction is realized. Last but not least, this work may contribute to highlighting the significance of water surface detection which current airborne LiDAR bathymetric systems overlook.

Keywords: Airborne LiDAR Bathymetry, Waveform, Capillary- Gravity Wave, Timing Detection Method

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Taiwan University

² Master, Department of Civil Engineering, National Taiwan University

* Corresponding Author, Phone: 886-2-23678645, E-mail: jejaw@ntu.edu.tw

Received Date: Mar. 05, 2012

Revised Date: Jun. 13, 2012

Accepted Date: Jul. 24, 2012

評估應用透水光達於台灣近岸海域水深測繪

王驥魁^{1*} 陳桂嘉² 林志交³

摘要

透水光達(Airborne Laser Bathymetry, ALB)為近年海域測繪領域之先進技術，其利用空載雷射掃瞄儀搭配慣性導航儀(IMU)及全球定位系統(GPS)，可快速且有效地獲得近岸海域(含潮間帶)的三維地形資料，故對於建立數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)以及分析地形之變化等相關研究實為一大幫助。本研究利用 Hawk Eye II 透水光達系統，評估台灣沿岸海域之水深資訊建置成效，並以多音束掃瞄成果與其進行精度之分析。研究結果顯示，透水光達掃描系統與多音束掃瞄的測繪成果皆呈現一致性之趨勢，應用於近岸海域之測繪實屬可行。

關鍵詞：透水光達、水深測量

1. 前言

近岸海域測繪目的除了探測船隻航道之深淺，提供航道之障礙資訊，隨著工商業的發達與科技之進步，水深量測的功用已從單純的航道測深、港埠設施擴充及碼頭設計施工等海岸工程規劃，擴展到海域資源探勘、佈設海底管線與電纜、填海造地及海岸環境變遷、海岸防災等領域。

水深量測項目大致可包含基準點引測(平面控制點及高程控制點)、岸線量測(含潮間帶量測)、海上定位、水深量測及潮汐調查等。水深測量工具大多以漁船或遊艇，更淺的水域則以船筏搭載測深儀，或利用無人載具遙控船進行施測。隨著量測的設備和方法日新月異，水深量測已成為一門非常專業的整合性技術，使用的儀器也由傳統的直接量測，進步到衛星遙測、音響量測(Sound Navigation and Ranging, SONAR)和空載透水光達探測(Airborne Laser Bathymetry, ALB)等(Chust *et al.*, 2010; Gao, 2009; Pe'eri and Philpot, 2007; Purkis and Klemas, 2011; Wang *et al.*, 2011; Wang and Philpot, 2007)。衛星遙測須受軌道繞行時間與拍攝時之大氣狀況而無法提供即時性的資訊，或因衛星影像之空間解析

度不足而在應用上有其不便之處。音響測量則是普遍應用於水深測量，但受限於地形與海象因素，施測不易，且此類方式對水深僅數公尺之極淺水域的水深測量效率頗低，甚至因礁岩阻擋無法測量(Maune, 2007)。而空載透水光達具有效率性、快速、安全、高密度及高精度等優點，故可稱為新一代快速及精確之測量利器(Guenther *et al.*, 2000a)。

ALB 用於水深測量之概念始於 1960 年代，首部可商業運轉的系統起始於 1984 年之 Larson 500 系統(Maune, 2007)。空載透水光達系統於實際測量時可達之最大水深，係取決於施測範圍內水體透明度(通常以沙奇盤深度表示)。依據實測經驗，透水光達的可測深度約為沙奇盤透明度(Secchi Disk Visibility)的 2~3 倍。若水體的吸收能力較強，則透水光達可測深度約為 2 倍沙奇盤深度，反之，若水體的散射能力較強，則透水光達可測深度約為 3 倍沙奇盤深度(Guenther *et al.*, 2000b; Maune, 2007)。若能於夜間施測，則因為感測器不受太陽光線影響，感測訊號具有較高的訊噪比(Signal-to-Noise Ratio)，亦可達到較大之可測深度。爰此，本研究希冀運用空載透水光達技術之優勢，提升近岸海域地形測量之施測效率，評估此技術於台灣地區近岸海域之可

¹ 國立成功大學測量及空間資訊學系 副教授

² 國立成功大學測量及空間資訊學系 研究助理

³ 中興測量有限公司光達系統室 測量技師

*通訊作者，電話：06- 2757575 ext.63825，E-mail: leepf@ntu.edu.tw

收到日期：民國 100 年 11 月 11 日

修改日期：民國 100 年 12 月 10 日

接受日期：民國 100 年 12 月 27 日

行性，提供未來相關水深量測之重要參考。

2. 材料與方法

2.1 測區與飛航掃瞄規劃

本研究共三個測試區域，包含東北角、墾丁與台東海域，圖 1 至圖 3 分別為研究測區位置圖。東北角測區為東西走向，西起基隆澳底，東至鼻頭角，規劃掃瞄面積 49 km^2 ，共 28 條航線(其中包含 2 條垂直航線)。台東測區為南北走向，北起台東縣成功鎮，南至台東縣東河鄉，規劃掃瞄面積 45 km^2 ，共 19 條航線(其中包含 1 條垂直航線)。墾丁測區包含恆春半島東半部，由墾丁青年活動中心至屏東縣滿州鄉呷呷連，規劃掃瞄面積 59 km^2 ，共 78 條航線(因航線互相垂直，故未另設垂直航線)。

除東北角測區，部分航線的航高為 500 m 離海面高，大部分航線的飛航高度皆為 400 m，因此各航線之間距約為 230~300 m，航線帶寬約為 270~330 m，重疊帶寬為 30 m。載具飛行速度為 150 knot，單航線的海域測點間距至少 $3.3 \text{ m} \times 3.3 \text{ m}$ ，陸域則可達 $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 。本研究由墾丁開始施測(2008 年 8 月 24~27 日)，中間轉至台東測區(2008 年 8 月 26 日)，最後至東北角測區(2008 年 8 月 29 日至 9 月 1 日)。

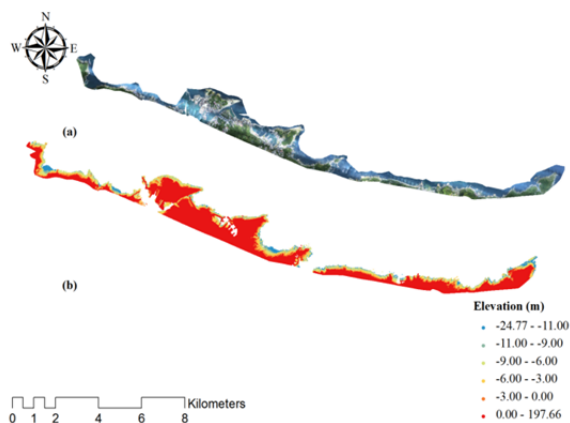


圖 1 東北角測區(a) 鑲嵌影像，(b) 陸域與海域數值地形圖

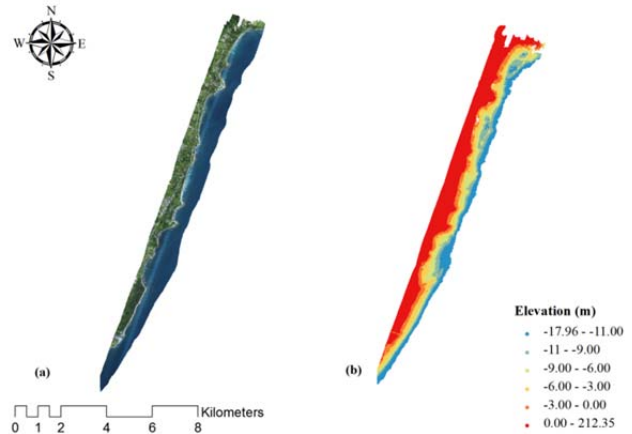


圖 2 台東測區，(a) 鑲嵌影像，(b)陸域與海域數值地形圖

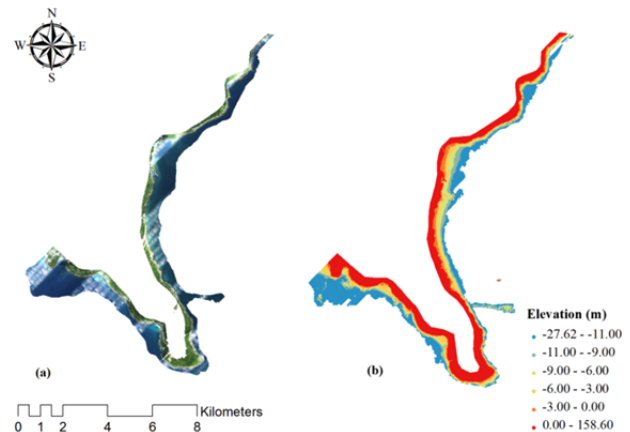


圖 3 墾丁測區，(a) 鑲嵌影像，(b)陸域與海域數值地形圖

2.2 Hawk Eye 透水光達系統

透水光達系統包含三個主要的次系統，分別為雷射測距儀(Laser Ranging)、全球定位系統(GPS)以及慣性系統(IMU)。雷射測距儀之乃是藉由紀錄雷射光束發送與接收之時間(time-flight)，量測水面與水底與光達系統之距離。

Hawk Eye 空載透水光達系統使用 532 nm 綠光波段的脈衝波，用於量測水底位置，另使用 1064 nm 的紅外線波段，用於量測水面位置與陸域高程資訊。綠光與紅外線波段的掃瞄頻率分別為 4 kHz 與 64kHz。由於綠光波段的水面訊號強度容易受環境因素影響(水面浪花、海鳥等)，而產生劇烈變動，因此，透水光達系統將綠光波段以 20° 的入射角射向水面，以增加水面訊號的穩定度，以求得正確的

水面位置(如圖 4 所示)(Guenther *et al.*, 1996)。

本次測試使用的 Hawk Eye 系統搭載於 Aero Commander 690 定翼機，通常飛行速度為 150 knot (290 km/hr.)，陸域的平面與高程均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)可分別達 0.25 m 與 0.50 m；水域的平面與高程均方根誤差則分別為 2.5 m 與 0.25 m。此次的定位系統為 Applanix POS AV410，並有一具二百萬像素的數位相機紀錄水域狀況與用於生產正射鑲嵌影像(mosaic image)，如圖 1(a)、圖 2(a)、圖 3(a)所示。

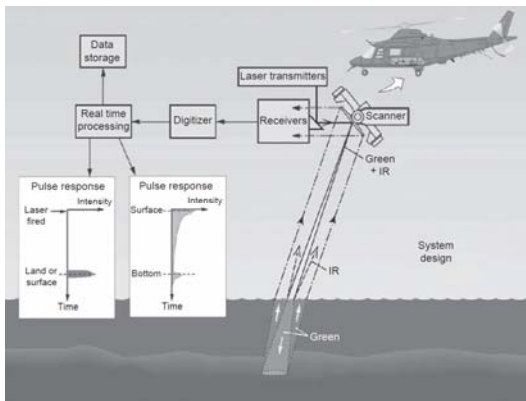


圖 4 透水光達掃描方式示意圖(Arumugam, 2008)

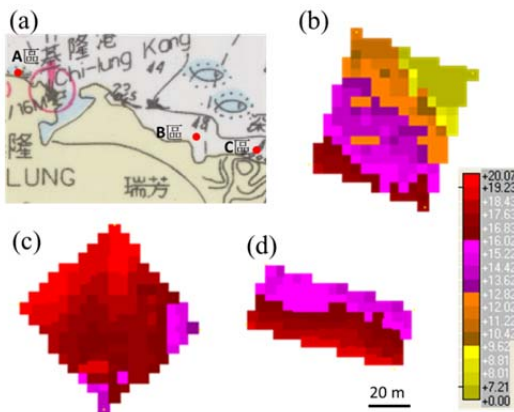


圖 5 (a)東北角測區海域控制面分佈。(b)A 區，(c)B 區，(d)C 區

2.3 透水光達資料後處理

水深實測值必須扣除因潮差所導致之水深差值，故本研究除利用中央氣象局後壁湖潮位站資料進行差值換算之外，亦自行設置驗潮站以供換算光達點雲資料之用。擺設之地面基站及潮位站坐標均利用北港衛星追蹤站進行平面及高程坐標之檢測

計算，所得坐標以上述基準提供飛航軌跡計算。

由於海底地形之點雲資料可能包含許多不合理點雲如，水面船艦或水下反射的雜訊而發生類似陸域光達之不連續面狀況，因此錯誤點濾除需配合彩色正射影像加以輔助進行，而完成後方可獲得不規則之透水光達點雲成果。此外，因獲取之空載透水光達資料尚為 WGS84 之橢球高，故水下地形成果將以臺灣大地起伏模式(黃金維，2003)進行高程基準轉換，並以測區之每日觀測潮位資料所換算的 TWVD2001 正高成果進行兩者間的高程值比較，以確認橢球高轉換至正高系統之正確性。

2.4 透水光達資料後處理

本研究分別在東北角與墾丁測區選取平緩底床，作為海域檢核面(Sea Control Area, SCA)，用於驗證 Hawk Eye 透水光達的測深精度。東北角海域檢核面資料為三個約 40 m × 40 m 的方形範圍，取自內政部提供的海域基本圖，其位置示於圖 5。墾丁測區的海域檢核面資料則以 Kongsberg EM-3002 多音束聲納測深系統，搭配 Trimble DSM 232 GPS 定位系統與 Applanix POS MV 320 慣性導航儀，並配合自設的 GPS 基站以差分運算進行定位，於 2008 年 8 月 27~29 日獲取二個 200 m × 100 m 帶狀區域水深資料，並生產為 2 m 網格的水下數值高程模型，墾丁掃描作業位置如圖 6 所示之 A、B 區。

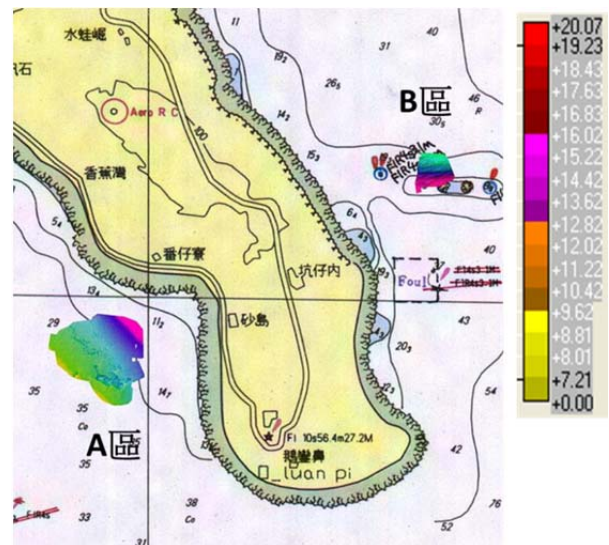


圖 6 墾丁測區海域控制面(A、B 區)

3. 結果與討論

3.1 透水光達掃描成果

經由濾除不合理之點雲作業後，三個測區所獲得之不規則透水光達點雲成果如圖 7~9 所示。由點雲成果圖發現，利用透水光達進行海域測繪之可測深度，各測區分別為，東北角測區 12 m，台東測區 16 m，墾丁測區約為 26 m。此三個測區於施測時段，使用 MDOIS 影像推估之沙奇盤深度分別為，東北角測區 10.5 m(8 月 29 日)，台東測區 10.2~11.2 m(8 月 26 日)，墾丁測區 7.1~9.8 m(8 月 25、26 日)(王驥魁、等，2009)。顯示墾丁測區之測深效率最高，可達 2-3 倍沙奇盤深度，台東測區次，約 1.5 倍沙奇盤深度，東北角則僅約 1.2 倍沙奇盤深度。

3.2 內部精度分析

本研究利用多條航帶重疊處分別於組三角網格(TIN)後進行高差比對，以平均差量(Mean Error)及平均絕對差量(Mean Absolute Error)表示航帶間之內部精度成果。圖 10-12 分別為東北角、台東、墾丁測區之各航線重疊處誤差分析成果，東北角之平均絕對差量為 0.287~0.336 m，台東測區之平均絕

對差量為 0.3~0.22 m，墾丁測區為 0.229~0.459 m。各測區之平均差量分佈為，東北角 -0.096~0.078 m，台東測區 -0.101~0.173 m，墾丁測區為 -0.244~0.415 m。

3.3 外部精度分析

將東北角測區 SCA 資料(圖 5 中，SCA 1、SCA 2 及 SCA 3)與透水光達成果進行比對，所有 SCA 點與透水光達系統於海域之成果進行高差比對，其成果統計如表 1，平均值及均方根差各為 0.32 m、0.11 m、0.1 m 及 0.63 m、0.99 m、0.7 m。

墾丁測區之 SCA 成果如圖 6 所示。其中，由於 B 區水深較深，透水光達點雲數量稀疏，無法進行精度分析，故本研究僅針對 A 區之透水光達測繪成果進行精度驗證。經由統計分析兩者之誤差量(表 1)則顯示，平均誤差為 -0.92 m、均方根差為 0.967 m。由於多處多音束水深點均已超過透水光達測區之可測深度，而 A 區又受限於可供比較點屬水深較深之區域，且該區域之透水光達資料含有較多雜訊，故進而影響兩者比對之成果。

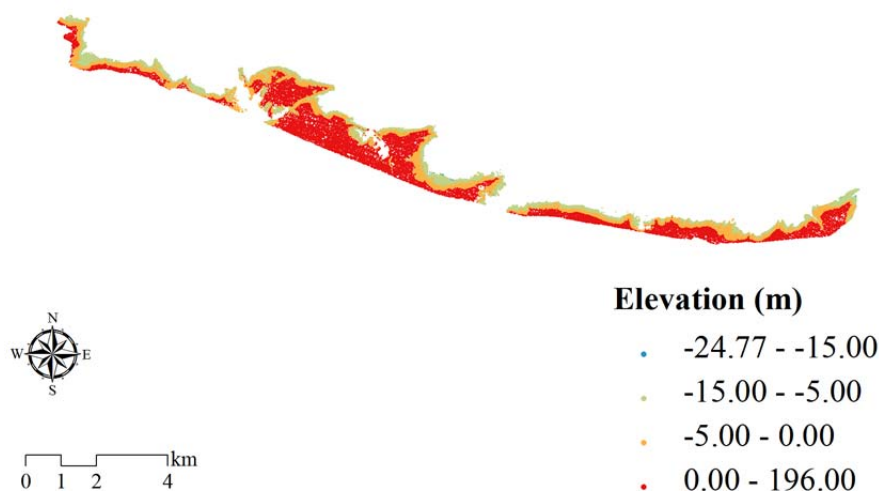


圖 7 東北角測區透水光達點雲成果

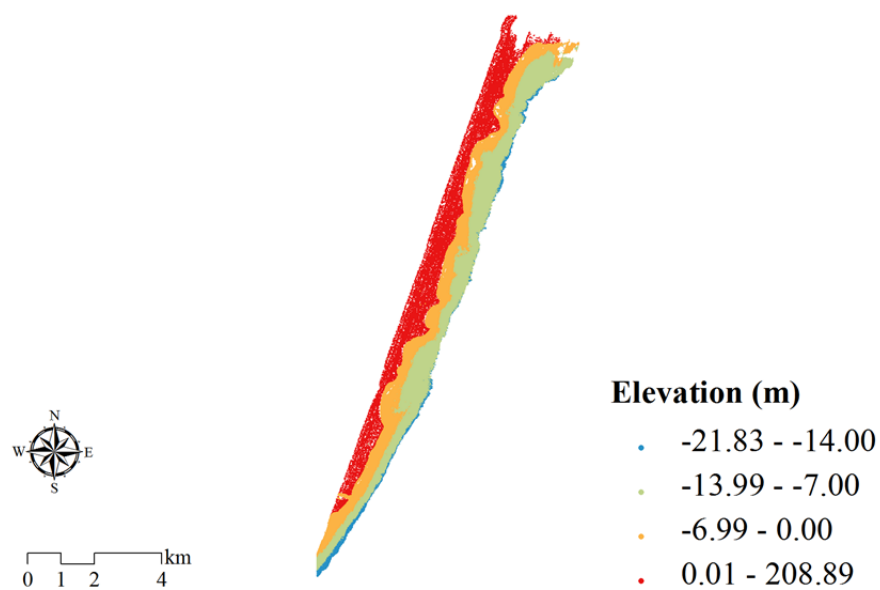


圖 8 台東測區透水光達點雲成果

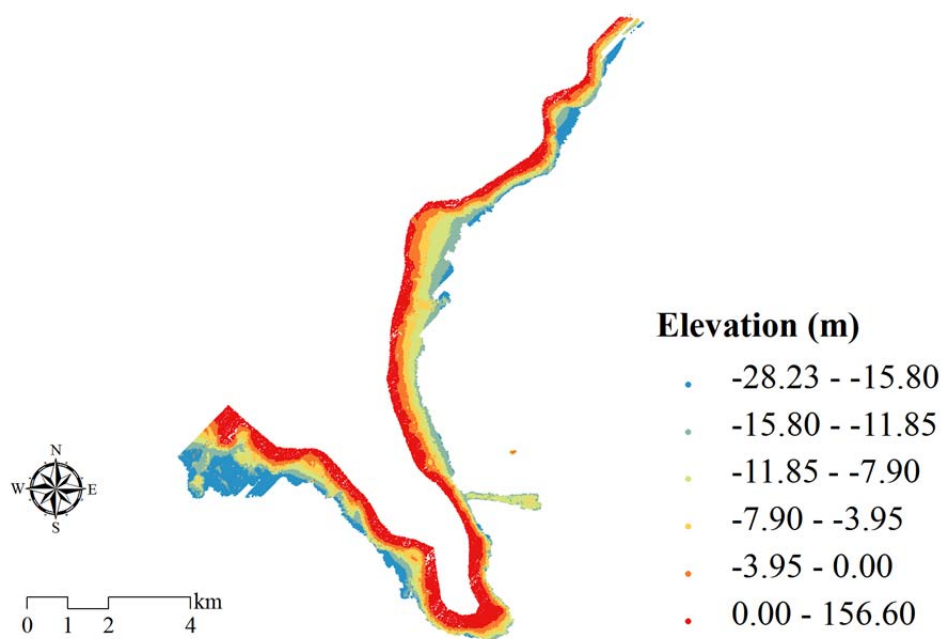


圖 9 墾丁測區透水光達點雲成果

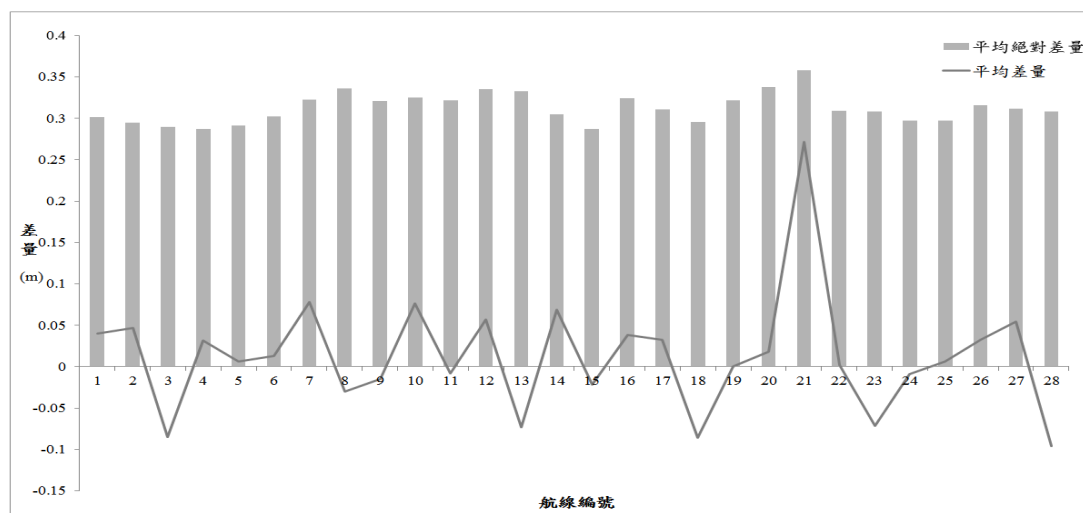


圖 10 東北角測區重疊航線處誤差分析圖

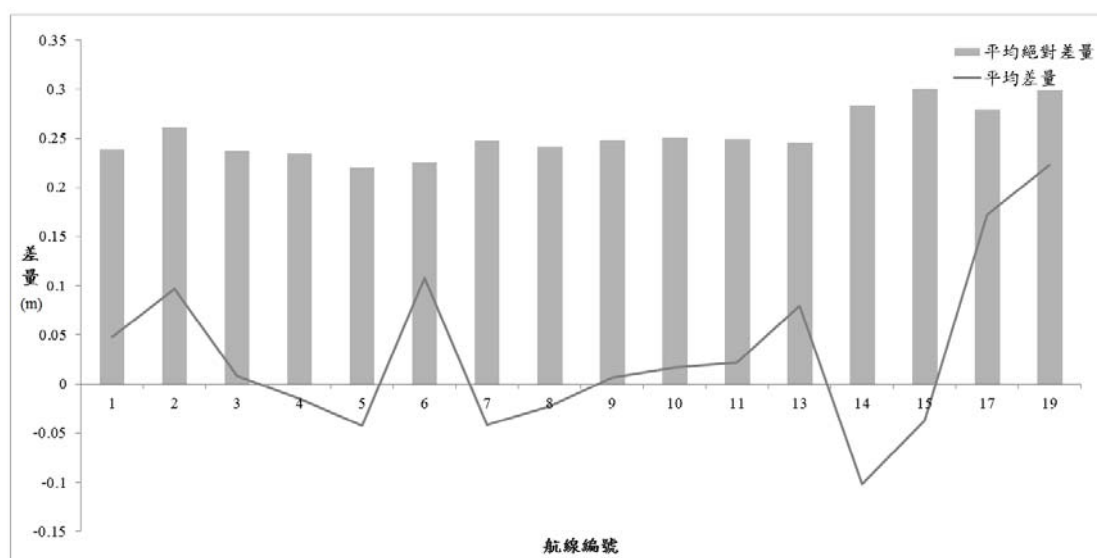


圖 11 台東測區重疊航線處誤差分析圖

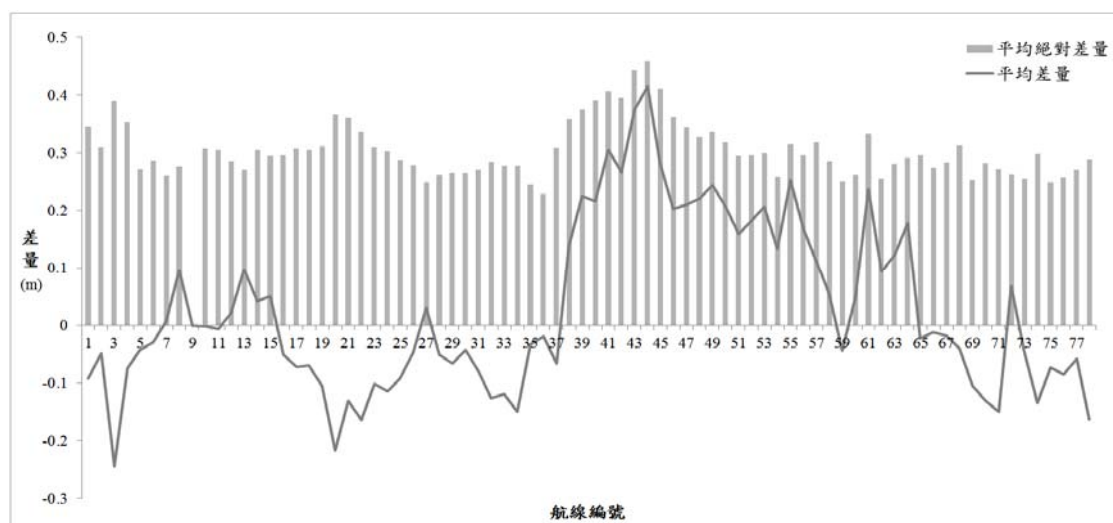


圖 12 墾丁測區重疊航線處誤差分析圖

表 1 SCA 比對精度分析表

	東北角		墾丁	
	SCA 1	SCA 2	SCA 3	SCA A
平均差量(m)	+0.321	-0.112	-0.133	-0.925
最小差量(m)	-1.160	-4.040	-2.120	-2.210
最大值差量(m)	+3.390	+1.340	+1.610	0.19
平均絕對差量(m)	0.518	0.714	0.639	0.925
均方根差(m)	0.706	0.994	0.790	0.967

4. 結論

依據本研究以 Hawk Eye II 系統測試於東北角、台東、墾丁三測區顯示，透水光達測深效率以墾丁測區最佳，可達 26 m(約 2~3 倍沙棋盤深度)。在同一地區之透水光達測繪成果與多音束掃瞄成果呈現相同之趨勢，而與沙奇盤透視度相比亦有良好之測深成果。因此可依據，利用長時間歷史 MODIS 資料推估台灣海域（約離岸二公里）之沙奇盤透視度成果（王驥魁、康哲銓，2009），進一步評估應用透水光達於台灣近岸海域之成效。此 MODIS 推估成果指出台灣沿岸海水透視度具空間變化，以東部海域之透視度較佳，南部海域次之，澎湖以北的台灣海峽海域則最差；時間變化方面，除東部海域透視度與季節相關性不高，各海域在冬季最差，約在春末時（5 月）可達最大之沙奇盤深度（如西部海域為 7 至 10 m）。考量沿岸二公里內的海水透視度變化，應會受河流輸沙、海底底質再懸浮之影響，沿岸二公里內的海水透視度數值應會較 MODIS 資料之推估數值小，透水光達之測深效率亦受影響。但仍應可預見，除台灣西部海域，透水光達施測時若能掌握海水透視度之季節變化，仍可應用於台灣（含澎湖）各海域。

致謝

感謝內政部提供經費，使本研究順利完成，特予致謝。

參考文獻

- 王驥魁、康哲銓，2009。利用 MODIS 影像推估台灣沿岸海水透視度，航測及遙測學刊，14：317-332。
- 黃金維，2003。台灣地區大地起伏模式精度評估，內政部。
- Arumugam, D., 2008. MOI Taiwan Bathymetric LiDAR - Hawk Eye II. 「應用透水光達技術於近岸海域測繪工作」教育訓練課程。
- Chust, G., Grande, M., Galparsoro, I., Uriarte, A., Borja, A., 2010. Capabilities of the bathymetric Hawk Eye LiDAR for coastal habitat mapping: A case study within a Basque estuary. Estuar Coast Shelf S 89:200-213.
- Gao, J., 2009. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. Prog Phys Geog 33:103-116.
- Guenther, G. C., Brooks, M. W., LaRocque, P. E., 2000a. New capabilities of the "SHOALS" airborne lidar bathymeter. Remote Sens Environ 73:247-255.
- Guenther, G. C., Cunningham, A. G., LaRocque, P. E., Reid, D. J., 2000b. Meeting the Accuracy Challenge in Airborne Lidar Bathymetry, EARSeL, Dresden.

- Guenther, G. C., Thomas, R. W. L., LaRocque, P. E., 1996. Design Considerations for Achieving High Accuracy with the SHOALS Bathymetric Lidar System, in Laser Remote Sensing of Natural Waters: From Theory to Practice: CIS Lelected Papers.
- Maune, D. F., 2007. Digital elevation model technologies and applications : the DEM users manual, 2nd ed. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Md.
- Pe'eri, S., Philpot, W., 2007. Increasing the existence of very shallow-water LIDAR measurements using the red-channel waveforms. Ieee T Geosci Remote 45:1217-1223.
- Purkis, S. J., Klemas, V., 2011. Remote sensing and global environmental change. Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex, UK ; Hoboken, N.J.
- Wang, C. K., Philpot, W., Kim, M., Lei, H. M., 2011. A Monte Carlo study of the seagrass-induced depth bias in bathymetric lidar. Opt Express 19:7230-7243.
- Wang, C. K., Philpot, W. D., 2007. Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters. Remote Sens Environ 106:123-135.

Evaluation of Bathymetric LiDAR for Taiwan Coastal Water

Chi-Kuei Wang^{1*} Kuei-Chia Chen² Chih-Chiao Lin³

ABSTRACT

Airborne Laser Bathymetry (ALB), enabled by the combination of laser scanning system, inertia measurement unit (IMU), and global positioning system (GPS), is a recent achievement for coastal water mapping. It is especially suitable for generating the digital terrain model and monitoring the change of the tidal area. In this study, the Hawk Eye II system was employed for two coastal areas of Taiwan. And, the results were evaluated against independent multi-beam surveys. It shows that the bathymetry obtained by Hawk Eye II is consistent with that by multi-beam surveys.

Keywords: Airborne Laser Bathymetry, Hydrography

¹ Associate Professor, I Department of Geomatics, National Cheng Kung University

² Research Assistant, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

³ Professional Surveying Engineer, Chung-Hsing Surveying Co., Ltd.

* Corresponding Author, Phone: 886-6- 2757575 ext.63825, E-mail: chikuei@mail.ncku.edu.tw

Received Date: Nov. 11, 2011

Revised Date: Dec. 10, 2011

Accepted Date: Dec. 27, 2011

水域測深方法暨原理探討

薛憲文^{1*} 史天元² 徐佳筠³

摘要

無論是基於對海洋及內陸水域經營管理或資源運用的需求，或是航行導航的需要，測深是探測水域之基本工作。從手持測量工具直到探測儀器問世，水深探測的方法與時漸進，如聲納利用聲波在水中傳導能量，測深光達則利用綠光雷射穿透水體。過去海洋測繪多利用船隻配合聲納做為主要測深工具，近期空載雷射掃瞄應用於近岸測繪，使得水深探測的範圍得以不受載具作業安全性之限制，而可以測繪近岸的淺水及多礁區域。本文主要探討比較聲納及測深光達兩種不同的測深方法之原理及作業方式。

關鍵詞：聲納、測深光達、水深

1. 前言

十五、十六世紀時因船隻航行導航的需求，促使人們對海洋的探測活動蓬勃發展(Cohen, 1980)。1930年代中期前，人們常使用測深錘(Lead line)、測深桿(Sounding pole)等自船隻降下測量工具獲取該點水深(Morang, 1997)，而後人們利用聲波及光束傳播之物理特性各自發展音響測深及光學測深。在淺水而不適合使用聲納設備時，可使用測深桿方便地量測水深(USACE, 2002)。光學測深中包含以光達測深及利用遙感探測光學影像推估水深，前者為主動式，後者為被動式。基於光的能量在水中容易衰減之特性，光學測深較適用的測深範圍為近岸50m水深內區域(Guenther, 2007)，而由被動式光學影像推估水深其可作業範圍則更為有限。

隨著科學的進步發展，遙感探測技術利用飛機或衛星做為載台，在其上搭載感測器得以拍攝大範圍的地面影像，利用在多個波段間不同底質的反射量之比例相同之假設，即可以遙感探測影像套用反射量模型進行水深演算推估(Lyzenga, 1978)。

若以探測方式分類，音響測深及光達測深為主動式測深，透過遙測影像推估水深則屬被動式。若

以資料類型區分，以測深錘及測深桿獲取為點狀分布之測深資料，單音束聲納則獲取海底地形剖面，直至多音束聲納發展後得對海床地形有全覆式的探測，光達測深掃描亦有此特性。

雖然可以達成探測或推估水深的方法有許多，由衛星或空載光學影像反推，或由重力反演，目前作業可達精度與可靠度均低於工程需求。全測站經緯儀、GPS、以人工持標尺取樣或配合沙灘車，僅適用於灘岸淺水小區域之作業。測深錘及測深桿雖可達深水及較高精度，但是亦難於有高密度覆蓋。因此，目前主要作業方式為音響測深。本文以兩種可以達成面狀覆蓋且具有高精度之主動式測深方式，分別為聲納及測深光達，除分述兩種不同的測深方法之原理及作業方式，並就作業之各個面向，進行比較。

2. 聲納系統

聲納(SONAR, SOund Navigation And Ranging)一詞代表了利用聲波進行導航並測距的技術(Camp, 1970; Huff and Noll, 2007)，所使用的儀器稱之為音響測深儀(Echosounder)。聲波測距之發展可回溯至1912年，當時仍處於技術專利提出的階

¹ 中山大學海洋環境及工程學系 副教授

² 交通大學防災與水環境研究中心 教授

³ 交通大學防災與水環境研究中心 計畫助理

*通訊作者，電話：07-5252000 ext.5167，E-mail: swshyue@faculty.nsysu.edu.tw

收到日期：民國100年12月19日

修改日期：民國101年02月16日

接受日期：民國101年03月19日

段，至 1914 年因第一次世界大戰的爆發，為海下異物偵測之需求，而開始發展聲波測距相關儀器(Huff and Noll, 2007)。1925 年開始，始有音響測深儀提供商業服務，真正開始利用聲納測繪地形則是在 1958 年(Klein, 1968)。聲納依工作原理可分為被動式及主動式，被動式用於海下物體偵測，僅接收周圍環境目標物之聲波，而主動式則是向目標物發射聲波及接收回音，用於測距之聲納屬於主動式(Camp, 1970)。用於測距的聲納主要可分為單音束及多音束兩種，單音束聲納系統於 1930 年代開始發展(USACE, 2002)，多音束聲納系統則是在 1960 年代中期開始發展(Huff and Noll, 2007)。

2.1 測深原理

聲納利用聲波在水中傳播速度，及傳播時間差測定水深。聲波需經由介質進行傳導，在水中傳播時會受到溫度、壓力、鹽度等因素之影響。溫度、鹽度、壓力對光與聲波在水中傳播速度的影響量如表 1。在這三項因素中依比例而言，聲速受溫度影響最大，鹽度次之，最後是壓力；光速則較受鹽度之影響，但若以數量級差異而論，光速幾乎不受此三因素之影響。聲速之理論簡易計算式(Hovem, 2007)如式(1)

$$C=1448.6+4.618T-0.0523T^2+1.25(S-35)+0.017D \quad (1)$$

其中 C 為聲速(以 m/sec 為單位)， T 為溫度(以攝氏為單位)， S 為鹽度(以‰為單位)， D 為深度(以 m 為單位)。在水中之聲速一般可大約視為 $1500 m/sec$ ，然而水溫每增加 $1^\circ C$ ，聲速增加 $4.5 m/sec$ ；鹽度每增加 $1‰$ ，聲速增加 $1.3 m/sec$ ；壓力每增加 $100 m$ ，聲速增加 $1.7 m/sec$ 。依地域而言，在低緯度地區淺海聲速大約在 $1500\sim 1540m/s$ 之間(劉金源, 2001)。

典型單音束測深儀主要的構造包含音鼓(transducer)、紀錄器(recorder)、發射及接收主機(transmitter/receiver)等構造(Jong *et al.*, 2002)。而多音束測深系統則可由多音束測深儀、船隻姿態收集器(motion sensor)、電羅經(gyrocompass)、聲速剖面儀(sound velocity profiler)或鹽溫深儀(CTD)、潮位站及地面 GPS 站構成(劉金源, 2001; Jong *et al.*,

2002)。船隻上搭載 GPS 接收儀利用 DGPS 或 RTK 技術進行平面位置定位，DGPS 之平面定位精度可為 $1\sim 3m$ 或 $1m$ 以內，RTK 之定位精度則為 $10cm$ 以內，其定位原理是將岸邊固定站做為已知基站，利用傳播已知基站之座標修正量決定船隻 GPS 接收儀之平面位置，經過儀器架設偏移量(offset)修正，求得音鼓所在之平面及垂直位置。

音響測深儀是將電能轉換成聲波能量，發射一個脈衝傳播至水體，當此脈衝接觸到一反射面後，此聲波能量會反射傳回，在接收此聲波後會將其能量轉換成電能強度，由紀錄器分析訊號計算傳播經過時間，並轉換成距離予以紀錄(Jong *et al.*, 2002)，測得水深可表示為下式(2)總和(USACE, 2002)

$$d = \frac{1}{2}(v \times t) + k + d_r \quad (2)$$

其中， v 代表水中聲速， t 為水中去回傳播時間， k 為因系統而異的訊號傳遞時間延遲之常數修正值， d_r 則為船隻吃水深，即從海面到音鼓安置位置之水深，如圖 1 所示。

依傳播能量的大小可將發射波束分為主波瓣(main lobe)及副波瓣(side lobe)，主波瓣範圍為 $-3db$ 能量衰減至一半處所張開的音束束寬(beam width)，音束束寬又稱為有效束寬，其餘為副波瓣(Huff and Noll, 2007)，如圖 2 所示。聲波能量傳播覆蓋在海床上範圍稱為足印(footprint)，音束的足印大小隨水深而變化(USACE, 2002)。以音束寬 9° 為例，在水深 $20m$ 時，足印直徑為 $3.15m$ ，如圖 3。

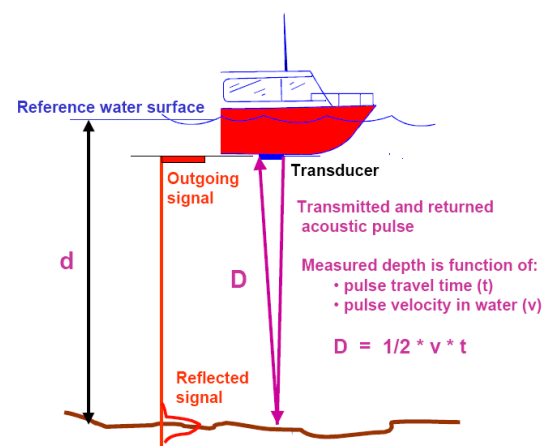


圖 1 聲納測深原理示意圖(USACE, 2002)

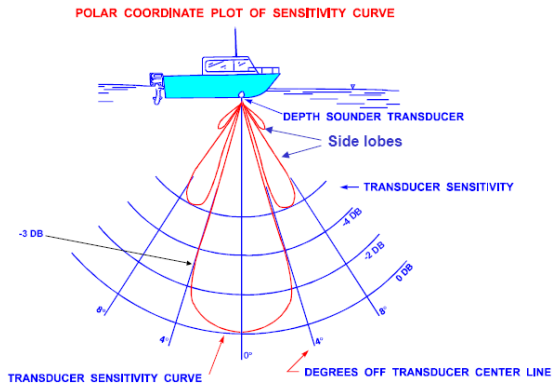


圖 2 單音束波瓣示意圖(USACE, 2002)

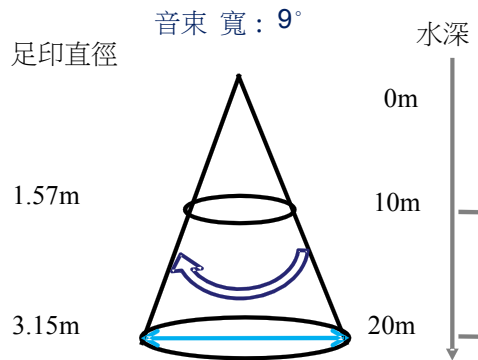


圖 3 單音束測深儀在不同水深之足印大小示意圖 (音束寬 9°)

表 1 光與聲波在水及空氣中傳播速度之影響因素表(Vine, 1972, Wagner, 1999)

量值	聲波	光
在海水中之傳播速度	1449-1552 m/s	2.254×10^8 m/s (折射係數1.333)
在空氣中之傳播速度	340m/sec (20°C, 正常大氣壓)	2.9971×10^8 m/s
溫度之影響量	0.18 %	$-0.007 (^\circ\text{C})^{-1}$
鹽度之影響量	-0.09 %	0.013 (‰)
壓力之影響量	0.01 %	$0.001 (\text{atm})^{-1}$

2.2 測深系統

典型單音束測深儀(Single-beam, or Vertical Beam Echo Sounder, SBES or VBES)的音束束寬為 30°，窄束寬聲納則是從 1980 年代中期後才出現。以製造實務而言，較窄的束寬需以較大直徑的音鼓才能

達成，其製造成本也較高(Huff and Noll, 2007)。單音束聲納僅能沿著測線獲取海床的地形剖面，如圖 4 顯示之海床地形剖面，在剖面上測深點的間距，與測深儀之資料更新率(update rate)以及測深時的船速有關(Hell, 2009)。另外單音束測深儀除可用於測深外，也可利用所接收的回波反射強度(backscatter)分析海床散射特性，藉以了解海床表面沉積物之特性(Guenther, 2007)。

多音束聲納非垂直測深，其系統的組成包含多音束測深儀及其他輔助設備如船隻姿態感測器及電羅經等(Wei *et al.*, 2010)，多音束測深系統如圖 4 所示，以多個窄束寬之音束構成測帶(swath)，可以補足單音束測深系統在測線之間遺漏水深或特徵物細節的問題(Jong *et al.*, 2002)。

2.3 高程系統

水深測量所使用之高程基準為潮位高系統，需由實測紀錄統計分析獲得，其中常用之基準包含平均高高潮位(Mean Higher High Water, MHHW)、平均高潮位(Mean High Water, MHW)、平均海水面(Mean Sea Level, MSL)、平均低潮位(Mean Low Water, MLW)及平均低低潮位(Mean Lower Low Water, MLLW)等(Zilkoski, 2002)，其中平均海水面為由有效紀錄計算所得每小時水面高之平均觀測值得到(Jong *et al.*, 2002)。潮位基準之採用隨應用目的而異，可分為高潮位、中潮位及低潮位系統。其中，中潮位系統是海岸結構物使用之陸地基準，通常使用平均潮位做為零水位之基準，理念上與大地水準面重合。而製作海圖時，因需考慮航行安全，通常使用低潮位系統，其水深基準常用平均低低潮位或最低天文潮位(Lowest Astronomical Tide, LAT)，平均低低潮位、最低天文潮位與平均海水面相對位置，可參閱圖 5。

傳統測深作業，均須配合驗潮。若驗潮站之所測潮位與水深測量處相同，則實測水深經瞬時潮位修正，即得以潮位為基準之海底地形。亦因此之故，傳統測深作業若使用全球定位系統(GPS)時，並不使用 GPS 高程資料。

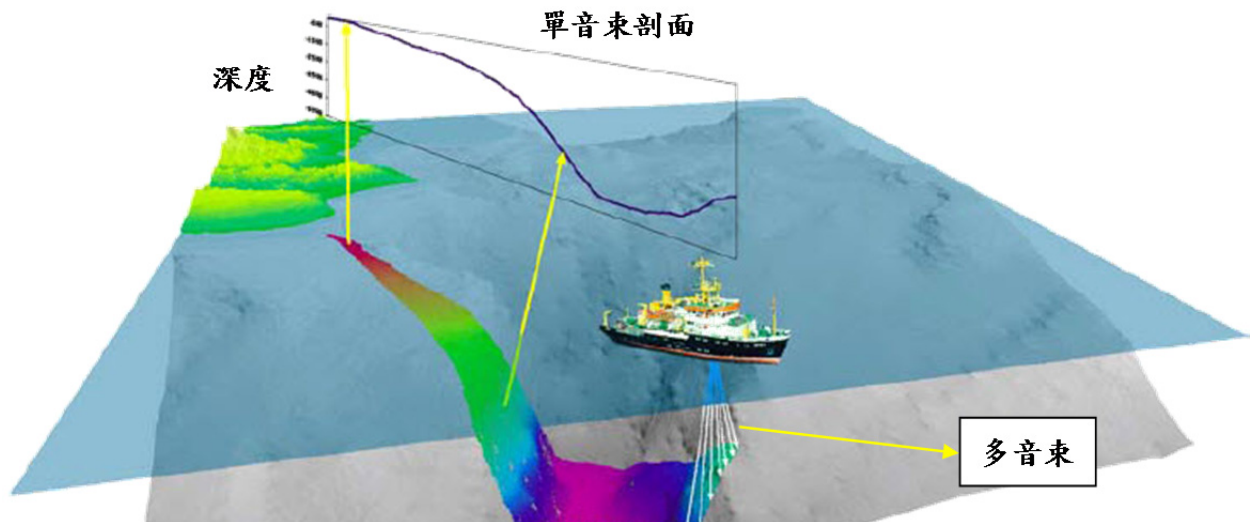


圖 4 單音束剖面及多音束系統施測示意圖(Hell, 2009)

2.4 聲納誤差來源

音響測深儀之解析度影響聲納測得水深之精度，解析度由幾項因素所決定：聲波波長、音束束寬、物體特性、入射角度，一般而言波長大小決定物體分辨之能力。此外，聲波傳遞衰減的程度由頻率高低決定，頻率低衰減程度較小，可測得之水深越深(USACE, 2002)。聲納誤差影響因素包含聲速剖面修正誤差、吃水誤差、潮汐修正誤差、載具姿態誤差、船隻船速變化誤差、海床反射誤差等(Jong *et al.*, 2002)。聲速剖面修正誤差，來自於所選用之溫、鹽、壓力等因子值，如圖 6 所示，若與現況有所出入，則產生聲速剖面差異，等同改變聲波傳播路徑，致使所測水深值產生誤差(Beaudoin, 2010)。

因單音束聲納常以聲波返回最短距離作為該點水深，因此海床坡度可能會影響測得水深。海床坡度造成之影響，如圖 7 所示。音鼓正下方的水深常被音束束寬內之最短水深所取代，使測得水深較真實水深來得淺。單音束所測到的海底地形之表現會受到音束足印解析度的影響，而使得所測量得之海床地形未能完全展現(Lurton, 2002)，如圖 8 所示。而多音束聲納受儀器架設之偏移量、船隻定位、音束所在角度、音鼓運動狀態、聲速剖面傳播變化量的誤差效應，對水深測值的正確性會造成一定程度

的影響，系統性誤差主要來自於儀器架設之偏移量(陳明欽, 2001)。其中，多音束聲納最主要的誤差來自 roll、pitch、yaw 三個方向的角度誤差及時間延遲(Wei *et al.*, 2010)。

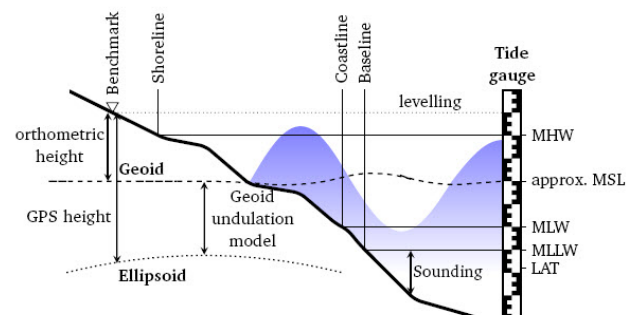


圖 5 最低低潮位與平均海水面相對位置示意圖(Hell, 2009)

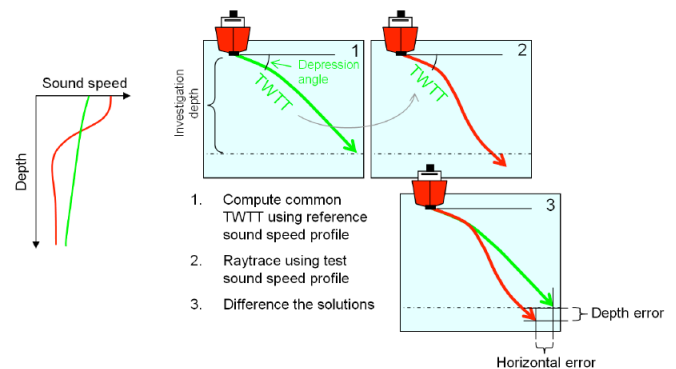


圖 6 聲速剖面修正誤差示意(Beaudoin, 2010)

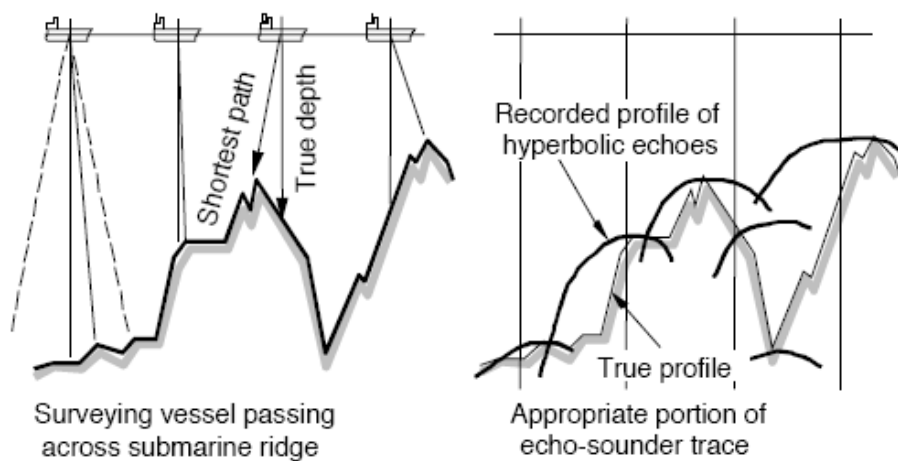


圖 7 單音束聲納受到海床地形起伏影響示意圖(Jong *et al.*, 2002)

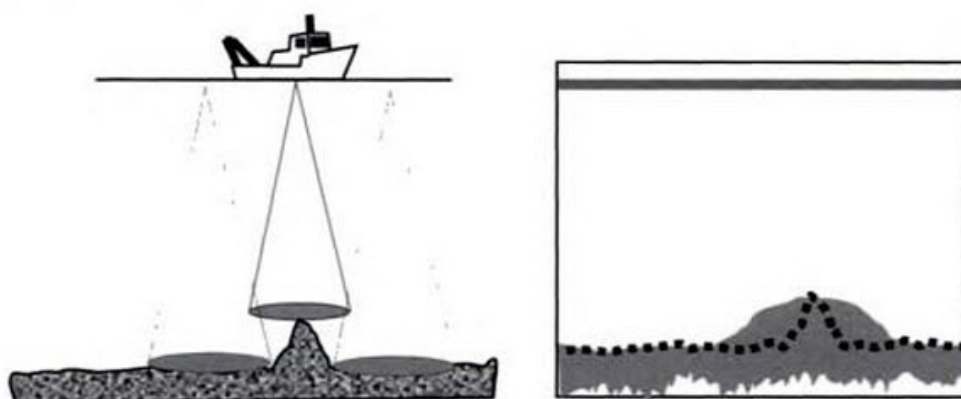


圖 8 單音束聲納系統解析度不足時之現象(Lurton, 2002)

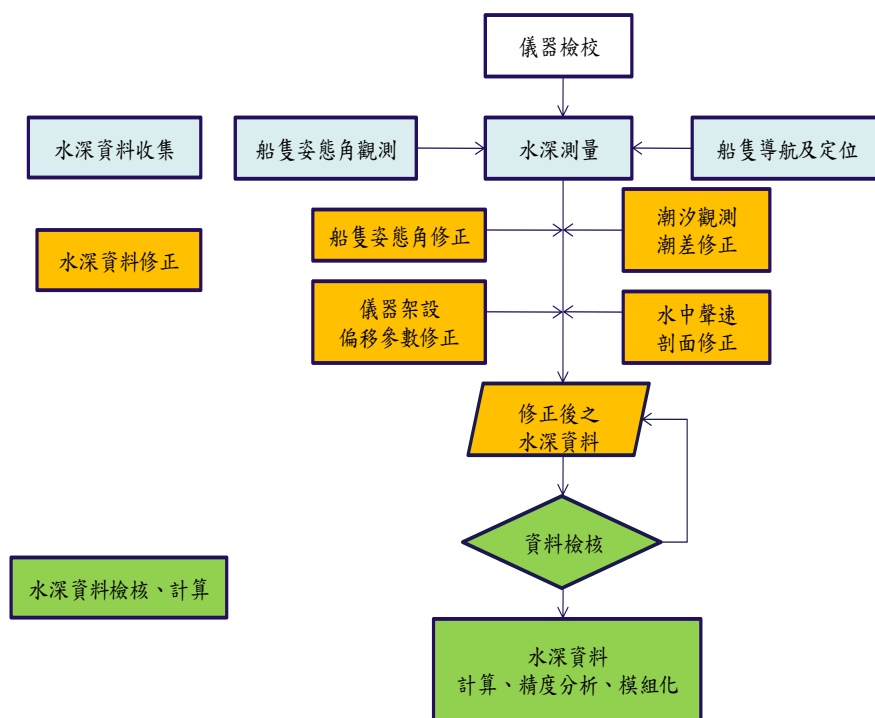


圖 9 水深資料處理流程圖(內政部，2003)

2.5 作業方式及處理流程

出海作業前需先以檢核板校正(Bar check)音鼓零點位置，施測時以 DGPS 或 RTK 進行定位，將航跡顯示於電腦螢幕上，並以船隻姿態儀收集船隻因風浪流潮汐所造成之船隻姿態偏差。此外，另應在測深作業前於測區內水深較深處施行聲速剖面量測，在外業時依據所規劃之測線將測得地形及定位資料同步收集，並儲存於電腦中。

依儀器架設位置之偏移量修正 GPS 之平面位置至音鼓，之後經過潮位化算並進行聲速剖面之修正，在資料處理完畢後仍需經人工編修去除雜訊及不合理之水深點，處理流程如圖 9 所示。

3. 測深光達

測深光達發展始於 1960 年代，由軍方發展使用雷射測距之技術探測水下物體如水雷、潛艇，於 1969 年由 Syracuse University Research Corp 研發之系統實證用於測深之可行性(Penny *et al.*, 1986)。此後美國、蘇聯、加拿大、瑞典及澳洲，皆相繼投入測深光達儀器的研發(Guenther, 2007; Kearns and MacDonald, 2008)。依照測深光達儀器的演進，可將發展年代分為 1970 年代初為第一代，自 1970 年代中期後至 1980 年代後期為第二代及第三代，1990 年代至近期的最後是現今發展及未來新一代儀器。Mallet and Bretar (2009)表列整理出現有的全波長光達系統及系統規格，包含科學研究及商業系統，其中測深光達包含有 LARSEN 500、Mark II、Hawk Eye、SHOALS 1000T 及 EAARL，截至 2010 年現有的商業系統包含 LADS、SHOALS 1000T、Hawk Eye II 等(史天元等，2010)，其中 EAARL 與其他系統不同，僅使用綠光波段進行測距。

3.1 測深光達之原理

測深光達由數個子系統組成，包含雷射掃描儀、慣性導航系統(INS)、全球定位系統等。利用雷射掃描儀發射的紅外光偵測水面，接收水面回訊後記錄時間，待系統收到綠光波段從海底反射之回訊再

次紀錄時間，藉此時間差乘上光速後可得待測距離之斜距，水中光速可定義為 $2.254 \times 10^8 \text{ m/s}$ (Wagner, 1999)。並利用地面控制站之 GPS 接收儀及載台上的 GPS 接收儀，配合 INS 所紀錄載台姿態，進行聯合動態差分求解載台之空間位置及姿態參數。最後使用經斜距改正之雷射測距資料，利用空間幾何關係換算至待測地表點位 WGS84 座標框架下之位置，即得到經過處理的點雲成果。定位方式則是採 DGPS 或定位精度更佳的 Kinematic GPS(KGPS)，使用 KGPS 定位載具至橢球面高度可將精度控制在數公分內，同時測量載具至海底的斜距，並不受潮位面高低之影響(USACE, 2002)。KGPS 使用載波相位技術，利用 OTF 求解周波未定值，並在資料處理時偵測及修復周波脫落之影響(Guenther *et al.*, 2000a)。其中，高程參考基準可由橢球高基準化算至海圖基準或是潮位高系統(Guenther, 2007)。

美國 NOAA 指出不同波段之光穿透水體時的衰減度不同，在外海及近岸地區水體的穿透能力如圖 10，唯臺灣近岸海域海水之濁度較高，所以光穿透水體能力較低，王驥魁、康哲銓(2009)曾採用 MODIS 推估臺灣沿岸海水之透視度。測深光達共使用兩種不同波長的雷射光束，所使用之 Nd:YAG 雷射之波長為 1064 nm，為紅外光波段，利用 Nd:YAG 晶體之非線性特性倍頻，即增加一倍頻率，可產生波長為 532nm 之雷射光，為綠光波段，利用此波段穿透水體能力可偵測海底位置。光入水後與水體作用會產生體散射現象，如圖 11 所示，以綠光波段為例，接觸到水面後收到的能量隨時間增加至波峰位置後減緩，直至接觸到水底後才會接收到第二波的波峰，在此階段前雷射光束的能量就會被水體所吸收呈現逐漸衰減的趨勢，如圖 12 所示。

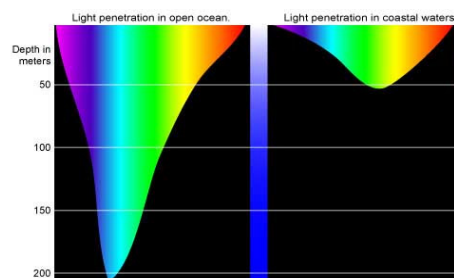


圖 10 外海及近岸地區水體的穿透能力示意圖 (NOAA, 2010)

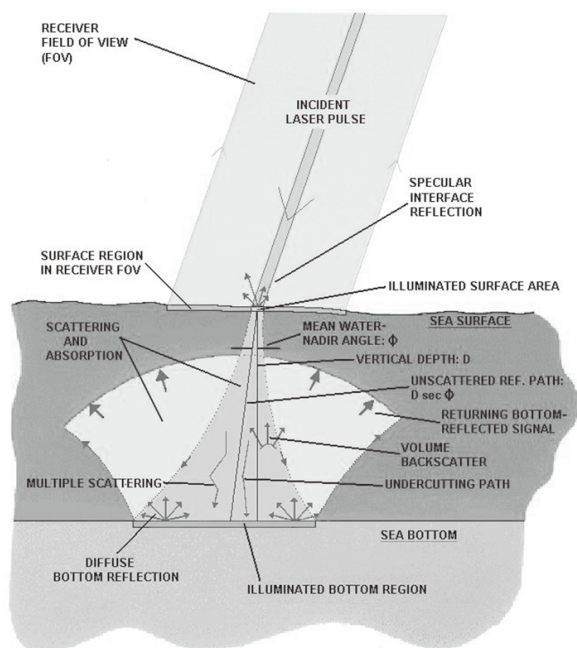


圖 11 測深光達之雷射入水後與水的交互作用 (Guenther, 2007)

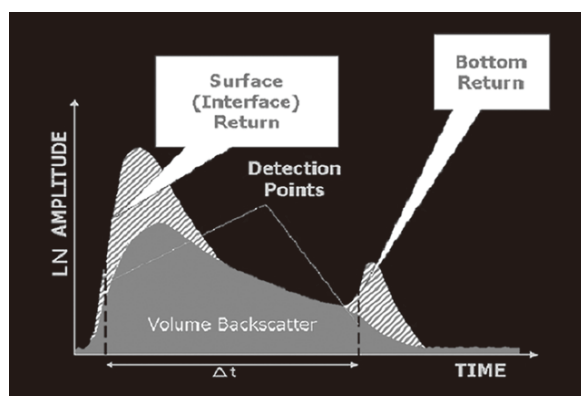


圖 12 測深光達接受能量與時間關係示意圖 (Guenther, et al., 2000b)

對光達系統而言，視場角(Field of view, FOV)為掃瞄線所對應之角度，與航高相乘，可以決定一個航帶之寬度，亦即測帶(Swath)之寬度。而每一個雷射光束，其光束發散角度(beam divergence)可視之為光達的瞬時視場角(IFOV, Instantaneous Field of View)。當然，不只是發射之光束發散角度，接收時亦有對應之可接收能量的範圍，此一角度，對應於地面一個足印(Footprint)，如圖 13 所示之綠色範圍由光軸方向向外開展角度， H 代表載體之航高。

測深光達之能力受限於待測水體之濁度，可測

得最深水深與水清澈度可寫為 n/K 之關係式，其中 n 是常數，白天施測時值約在 3、4 之間，夜晚時 n 值約為 5， K 代表綠光波段在水體之衰減係數。 n 值也與陽光之影響有關，測深光達在白天作業時因陽光之影響易產生雜訊(Guenther, 2007)。測深光達可測量之深度約為沙奇盤(secchi disk)測量深度的 2-3 倍之間。

3.2 測深光達之誤差來源

Billard *et al.* (1986)舉出數個影響光子路徑傳播應考慮之因素，如水深、入射角、水的湍急程度以及水面的粗糙度等，Tulldahl *et al.* (2000)討論海浪之坡度造成雷射光束折射角度增加，測得點位水深較真實水深為深，Tulldahl (2006)以數個波形說明海浪坡度較大時回波訊號較強，Chen *et al.* (2004)假設海底地形平緩，提供一誤差模型，其中未包含海浪坡度所造成之誤差，如圖 14，比較有無潮汐修正之影響，發現精度分別為 23cm 與 29cm，差距為 6cm。Kearns and MacDonald(2008)提到測深精度則會受到水湍急程度、海底陡峭地形及小物體之影響。而系統誤差(Bias)來自於載台姿態的 pitch、roll、航高、浪高及潮汐的影響，載台姿態的 roll 及 pitch 對測點可能造成影響如圖 15 所示。Guenther *et al.* (2000b)說明日光反影效應(sun glint)會造成白雜訊，另外 Guenther(2007)提出若測區含有珊瑚礁頭(coral head)或魚群會影響測深資料品質。

3.3 作業方式及處理流程

進行測深光達飛航任務之規劃流程包含飛航規劃、詳細規劃及資料流程管理、現地測量之管理(Kearns and MacDonald, 2008)。飛航中以電腦螢幕監看航線位置，現地掃瞄成果會儲存於電腦中，後續將於後處理完成資料生產。

掃瞄成果經後處理定位解算求出載台姿態及定位資訊，結合雷射測距資料產生點雲，處理雷射測距資料時需經過波形處理，來定義水面及水底位置，以此時間差乘上光速以換算得斜距。

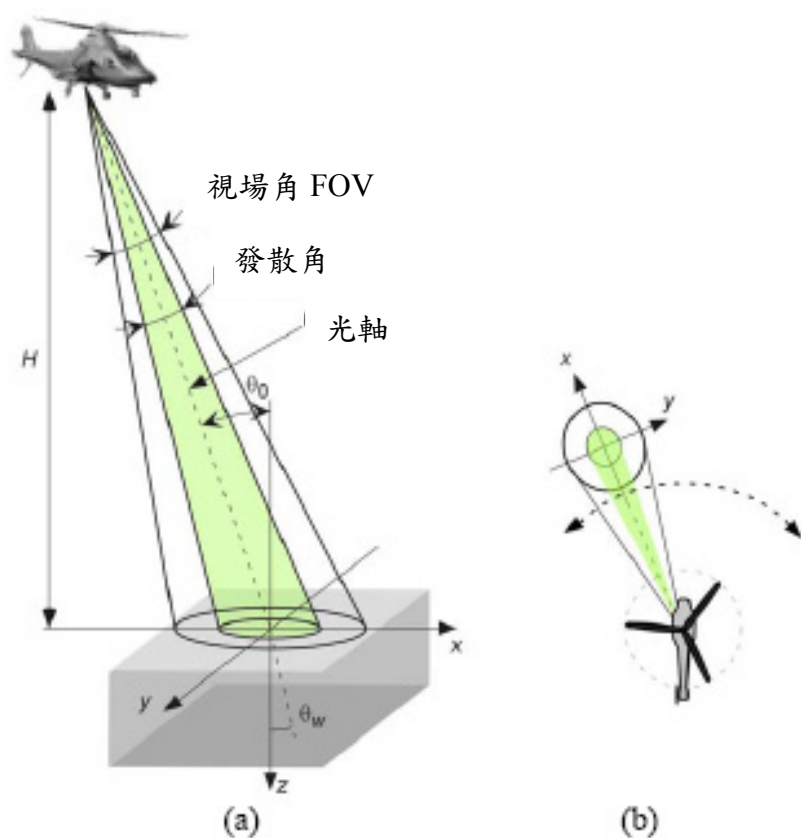
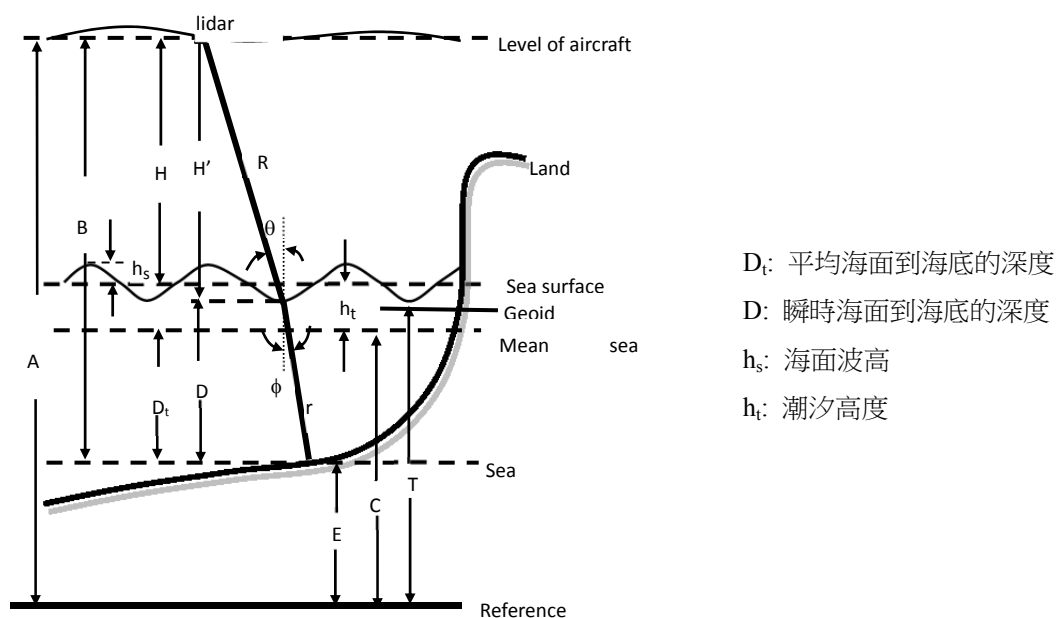


圖 13 系統掃瞄參數示意圖(Tulldahl, 2006)

圖 14 誤差模型示意圖(Chen *et al.*, 2004)

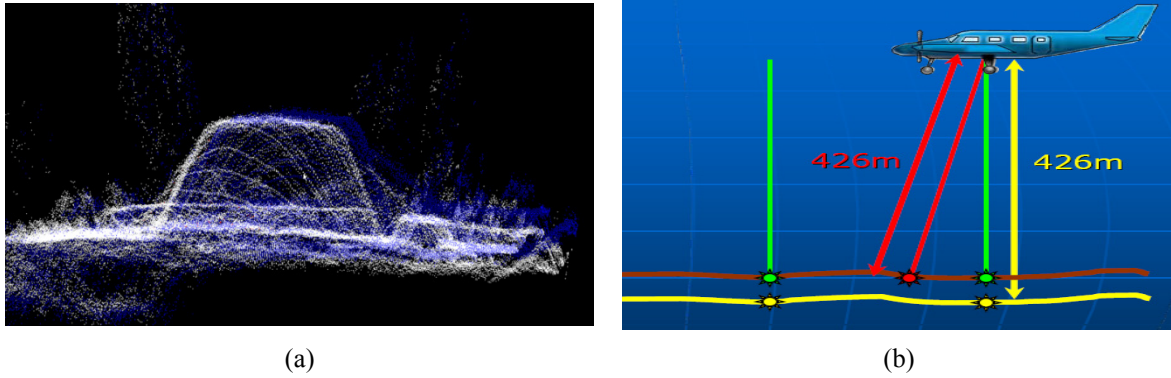


圖 15 載台姿態影響示意圖(a)roll 誤差(Schnurr, 2010) (b)pitch 誤差(Gonsalves, 2010)

4. 精度、效率、與經濟效益比較

國際上慣用由國際海道測量組織(IHO, International Hydrographic Organization)所制定規範作為水深測量之最低標準。最早「海道測量規範」為1968年所制定的第一版S-44，用於規範製作海圖所需之測量資料密度及精確度。目前最新規範為2008年所公告的第5版，於該內文中是以不確定性(uncertainty)來取代對精度、誤差等詞彙之描述，表2為IHO S-44第五版海道測量之最低標準。

目前測深光達對於海床特徵物的偵測能力尚在研究開發中，因此測深光達目前大多僅要求達到IHO 1b的規範。

評估測深光達精度之方式可分為內部精度及外部精度，內部精度為藉由平行航帶及交叉航帶重疊區之比對獲得。由內部精度可知光達測深資料彼此間之一致性，外部精度則是藉與聲納測深數據比對彼此之差異作為驗證基礎。使用聲納測深資料做為參考，進行測深光達之水深精度評估方式之研究，有Lockhart等(2008)利用聲納資料計算在不同水深時，測深光達獲取之測深資料因地形產生之深度差量變方(variance)與總傳遞不確定性(Total Propagated Uncertainty, TPU)比較，以此評估系統性誤差及隨機誤差對測深值產生之影響；Costa等(2009)利用水深點組成的海底地形面進行相減；McNair(2010)利用TerraSolid工具將測深光達測點組TIN進行高程值比較；而Chust等(2010)將聲納

水深點鄰近點高程先平均再與測深光達測得水深點高程相減。

Fledermaus 軟體之 Crosscheck 工具常用於進行水深資料的交錯檢核，其比對方式為以密度較高之數據內插形成網格式數值地形的參考面資料，再與另一組交錯或重疊的水深點數據比對。由逐點平面位置在參考面內插後，與各點實測數據比對。Crosscheck 工具在交錯檢核計算後會提供一個表格，其內容包括：參考面之點數(Number of Data Points)、檢核點之平均水深(Data Mean)、參考面之平均水深(Reference Mean)、較差平均值(Difference Mean)、較差中值(Difference Median)、較差之標準差(Difference Standard Deviation)、檢核點之水深範圍(Data Z-range)、參考面之水深範圍(Reference Z-range)、水深較差之範圍(Difference Z-range)、IHO 一等測深之誤差範圍(Order 1 Error Limit)、IHO 二等測深之誤差範圍(Order 2 Error Limit)、IHO 一等測深之信賴區間(Order 1 P-Statistic)、IHO 二等測深之信賴區間(Order 2 P-Statistic)、一等測深-被剔除之水深點數(Order 1- # Rejected)、二等測深-被剔除之水深點數(Order 2- # Rejected)、IHO 一等測深通過與否(IHO Order 1 Test Status)、IHO 二等測深通過與否(IHO Order 2 Test Status)等項目。

表 2 IHO S-44 第五版海道測量之最低標準

等級	特等	一等 (1a)	一等 (1b)	二等
典型水域範例	水深 40 公尺以內的港區、錨泊區和重要航道等需要船底淨空水域	水深 100 公尺以內的港區、進港航道、建議航道船底淨空需求較少的水域	水深 100 公尺以內，沒有船底淨空需求的水域。	水深超過 100 公尺的水域
水平位置最大容許不確定性(95%信賴區間)	2 公尺	5 公尺+5%水深	5 公尺+5%水深	20 公尺+10%水深
歸算後水深的水深最大容許不確定性(95%信賴區間)*	a = 0.25 公尺 b = 0.0075	a = 0.5 公尺 b = 0.013	a = 0.5 公尺 b = 0.013	a = 1.0 公尺 b = 0.023
100%底床搜尋	需要	需要	不需要	不需要
測量系統對海床特徵物的偵測能力	大於 1 公尺的海床特徵物	水深 40 公尺以內大於 2 公尺的海床特徵物；水深超過 40 公尺時為 10%水深	不需要	不需要
最大測線間距	已要求 100%底床搜尋	已要求 100%底床搜尋	3 倍測區平均水深或 25 公尺，取較大者；測深光達測點間距 5 m x 5 m	四倍測區平均水深

* 水深最大容許不確定性之公式為 $\pm\sqrt{[a^2+(b*d)^2]}$ ，其中 a,b 為常數，d 為水深

由於測深光達與各種聲波測深儀器之足印大小不同，在比對兩種測深方法所獲成果之差異時，測試區應盡量優先選擇海床平坦之處；且應考慮兩種方法之測深時間越接近越好，兩種測深方法亦應儘量在海象較佳時為之；若海床上有植物生長，亦應審慎評估這些植物對於兩種水深測量方法所造成之差異。所採用之聲學驗證儀器可以為單音束測深儀或多音束測深系統，唯需注意兩種測深儀在不同測區特性所造成測深之差異。

如前所述，傳統測深須配合驗潮，所測深度與橢球無關。但是，依據「高程現代化」(Height Modernization)之觀念，配合 GNSS 之發展，水深測量亦可於橢球高系統中進行，再依據大地起伏模

式進行化算得正高，或進行潮位化算得潮位高，此一作為經實證確實可行。若欲將橢球高轉換為正高，則需要減去該地區之大地起伏，而大地起伏模式則有全球性模式及較細緻之區域性大地起伏模式，唯在使用前須要驗證該大地起伏模式之適用性。另外此工作尚須配合該區域之高程系統建立，及該海域範圍之大地起伏分布，才可以推算海底地形之正高值。若欲將橢球高轉換為潮位高，除了需要在較不受波浪及船隻航行影響的適當地點設置驗潮儀，與該區域之水準點系統聯測之，並需要推估出來該驗潮站之平均海水面或最低低潮位面，再配合潮位觀測資料及等潮區資料來進行潮位修正，藉以獲得以平均海水面或當地之最低低潮位面為基準之水深

資料。

在內政部委託交通大學團隊之「以透水光達測繪技術測製東沙地區數值地形模型工作」計畫中，是採用 Geomatics Data Solutions 公司與 Pelydryn 公司團隊組合所使用之 AHAB HawkEye II 系統，並搭配 Swearingen SA-226T 航空器執行東沙環礁及澎湖部分海域之測深光達工作。HawkEye II 系統結合了地面及測深光達系統，可同時蒐集海域及陸域之數據，測深雷射波脈衝每秒達 4000 次，地面雷射波脈衝每秒達 64000 次。在測點密度為 3.5×3.5 公尺時，採用 400 公尺航高及 150 節航速，其帶寬約為 160 公尺，而航線規劃之側向重疊率為 20%。在澎湖地區共飛行 118 條航線，涵蓋 400 平方公里之海域，由馬公機場起降之飛行小時約 19 小時；在東沙地區共飛行 183 條航線，涵蓋 450 平方公里之海域，由東沙機場起降之飛行小時約 22 小時。在測點密度為 2×2 公尺時，採用 300 公尺航高及 150 節航速，其帶寬約為 120 公尺。在東沙地區共飛行 35 條航線，涵蓋 20 平方公里之海域，由東沙機場起降之飛行小時約 6 小時。由上述飛行統計資料可見測深光達對執行測深工作之效率極高，然而於這些外業工作時數之外，尚須要涵蓋許多飛航作業前之協調所需要的時間，這些工作至少包含：外國航空器飛航申請程序、航空器停靠、飛航作業區空域飛航管制(包含航管及戰管等)、油料補給、人員交通及食宿問題等後勤支援及載具過夜等事宜。及申請手續工作所需要的時間，包含申請航空攝影測量許可、空域使用許可、國外載具引進許可、作業時航道安排與許可等，這些申請程序在多個單位協助下順利的在約 3 個月內完成。

傳統以船隻為載具之聲學測深方法的測深效率，取決於下列因素：(1)所使用之船隻種類(例如：水上摩托車、橡皮艇、船筏、漁船或專用測量船)，(2)水深範圍(例如：極近岸、淺水域、一般海域)，(3)音鼓之固定方式(例如：船弦邊或船頭、船艙等)，(4)載具之航速等。若音鼓固定條件稍差，則常以 2-3 節航速進行測深工作，即若每日工作以 8 小時計算，則每日可以測量之測線長度約 29-43 km。若音鼓固定條件較佳時，則常以 5-10 節航速進行測

深工作，即若每日工作以 8 小時計算，則每日可以測量之測線長度約 72-144 km。但是需注意台灣地區之海象條件受到西南季風及東北季風之影響，一年之中適合進行以船隻為載具之聲學測深的時日會受到限制。另外需要特別注意的是，在海象條件極差的情形下進行水深測量，即使工作時有使用湧浪補償器(heave compensator)或船隻姿態收集器，所測量得到水深成果之品質仍會受到極大的影響。另外以船隻為載具之聲學測深在特定海域工作，諸如：東沙環礁之珊瑚礁地形或有淺礁地形等之海域，尤其是該海域所出版海圖之日期較為久遠時，更需特別注意測量船隻的航行安全。

雖然傳統以船隻為載具之聲學測深方法的測深效率無法與測深光達相提並論，但是此測深法所得到水深之足印可能較小，測深點密度高出許多，且較不會受到海域水質之濁度影響，作業機動性較高，對於海床或水層中特徵物之偵測與辨識能力較佳等之優點。而測深光達通常會配合裝置小幅相機來同時進行海、陸域水深及高程測量作業，因此可以由測深時之影像來辨識水面上之特徵物及當時海象狀況、與陸域地物特徵及高程等額外之資訊。

由於測深光達設備的投資較高，需要航空器來配合等特性，因此除了可以自行採購設備且自行操作外，另外的作業模式就是可以由私人測量服務公司代為操作。測深光達較為適用於水質潔淨海域之測深工作，因此在世界各國之案例中常被應用於離陸域較遙遠或多礁岩地形之海域，或水質濁度較低且地形變化較大之海岸重要地區為主，或是測量洪氾狀態，以利快速獲得淹水地區的相關資訊。

5. 結論與建議

測深方法有多種，可因應不同的需求從中選擇適當的測量方法。聲學與光學測深工作可互補，但在進行近岸水深測量時，測深光達在淺水區域較測深聲納作業更具安全性。相對地，在水深較深之處，以及特種精度要求之情況，測深聲納較測深光達更具可行性與經濟效益。

由於東沙環礁水深較淺且水質清澈，加上地處

遙遠之離島，船隻資源較為缺乏。雖然生態頗為豐富，但珊瑚礁地形對於船隻航行安全較有顧慮，因此造成以船隻進行全面生態調查有其限制。所以，內政部採用測深光達進行全面性之 3.5×3.5 公尺及局部 2×2 公尺海域之網格水深測量，極具時代性意義。此次之成果對於未來國家海洋公園管理處之環礁海洋生態與資源或海洋環境調查，或海巡署船隻在該環礁內之安全航行應該極有助益。唯該測深光達雖已達成 IHO 測深規範 1b 之等級，但並未針對海床特徵物進行偵測及辨識。雖然該次測深光達作業，尤其成果已經在環礁內發現海圖尚未被登錄之沉船等特徵物。但是若要以這些測深光達的資料進一步繪製海圖，則仍須要以傳統船隻配合聲學測深儀進行特徵物偵測及辨識。至於對於測量或生態調查船隻航線之規劃，應該可以採用全面性之 3.5×3.5 公尺網格水深先劃設出較為安全之航行路線，但是在執行測量或調查期間，須要注意環礁地形仍隨時有可能有突然高起的珊瑚礁或礁岩會影響船隻的安全。

雖然測深光達適合測量東沙、澎湖、綠島、蘭嶼、小琉球、彭佳嶼，甚至南沙島等離島地區，水淺且水質潔淨的海域，但是若能再深入的探討該測深系統對於台灣東西海岸的海岸變遷監測，或河川地形變化，或洪氾狀態之監測等應用，則更能進一步對於台灣的環境變遷有巨大的貢獻。因此測深光達在台灣地區適用於何時及何地，是可以繼續努力探討的。

由於目前大多數測深光達所獲得的海底地形是以橢球高為基準，因此在以傳統船隻為載具進行聲學測深方法驗證彼此測深之差異時，亦需要採用橢球高為基準的水深值，此乃為全世界正積極推行「高程現代化」的重要作法之一。因此 IHO 於 1988 年在 S-44 第四版中(p.11)積極的建議，除了以潮位觀測將水深測量值歸算至低潮位面(通常採用最低天文潮位, Lowest Astronomical Tide, LAT)外，宜同時歸化至地心參考座標系統之橢球高，以利未來全球海床水深值之整合。以橢球高為基準的作法對於欠缺等潮區(co-tidal zone)資訊的海域，例如：澎湖附近海域及東沙環礁等，可以先儲存以橢球高為基

準的水深值，在日後獲得詳細且正確的等潮區資訊後，再轉換為以潮位高為基準之水深值。也可以在日後獲得詳細且正確的大地起伏模式後，再轉換為以正高為基準之水深值。由於目前聲納測深作業多採用潮位高基準，而當代測深光達作業多採用橢球高系統，因此，整合聲學與光學測深資料時須注意測量之水深基準之一致性。

參考文獻

- 內政部，2003。研訂領海及鄰接區海域基本圖測量規範期末報告書，內政部主辦，國立中山大學及海洋科技研究中心執行。
- 王驥魁，康哲銓。2009，利用 MODIS 影像推估台灣沿岸海水透視度，航測及遙測學刊，第 14 卷，第 4 期，第 317-332 頁。
- 史天元、薛憲文、王慧蓉、陳杰宗、陳佳勳，2010。測深光達原理，現有系統與服務，地籍測量：中華民國地籍測量學會會刊，29(1)，44-58。
- 陳明欽，2002。淺水多音束聲納測深資料的誤差分析研究，國立台灣大學海洋研究所碩士論文。
- 劉金源，2001。水中聲學：水聲系統之基本操作原理，國立編譯館，619 頁。
- Beaudoin, J., 2010. Real-time Monitoring of Uncertainty Due to Refraction in Multibeam Echo Sounding, The Hydrographic Journal, (134):1-19.
- Billard, Brian, Ralph H. Abbot and Michael F. Penny, 1986. Modeling Depth Bias in an Airborne Laser Hydrographic System, Applied Optics, 25(13), 2089-2098.
- Camp, L., 1970. Underwater Acoustics. John Wiley & Sons, 308p.
- Chen Wei-biao, Yu-tian Lu, Chun-lin Chu, Guo-jun Zhai, Mo-tao Huang, 2004. Analyses of Depth Accuracy for Airborne Laser Bathymetry, Chinese Journal of Lasers, 31(1):11806-0-11806-7.
- Chust, G., M. Grande, I. Galparsoro, A. Uriarte, and A. Borja, 2010. Capabilities of the Bathymetric Hawk Eye LiDAR for Coastal Habitat Mapping: A Case Study within a Basque Estuary, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 89(3), 200-213.
- Cohen, P.M., 1980. Bathymetric Navigation and Charting, Ayer Publishing.
- Costa, B.M., T.A. Battista, and S.J. Pittman, 2009. Comparative Evaluation of Airborne LiDAR and ship-based Multibeam Sonar Bathymetry and

- Intensity for Mapping Coral Reef Ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 1082-1100.
- Gonsalves, Michael O., 2010. Point Cloud Simulation and Preliminary Geometric Calibration Utility for the Coastal Zone Mapping and Imaging LiDAR. Presented at 11th JALBTCX Coastal Mapping & Charting Technical Workshop at Mobile, AL.
- Guenther, Gary C, W. Mark Brooks, and E. Paul, 2000a. New Capabilities of the "SHOALS" Airborne LiDAR Bathymeter, *Remote Sensing of Environment*, 73(2):247-255.
- Guenther, G., A. Cunningham, P.L. Rocque, D. Reid, 2000b. Meeting the Accuracy Challenge in Airborne LiDAR Bathymetry. *Proceedings of 20th Workshop on LiDAR Remote Sensing of Land and Sea*, EARSeL, Dresden, Germany.
- Guenther, G. C., 2007. Airborne LiDAR Bathymetry, Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, 2nd edition, pp. 253-320, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland.
- Hell, B., 2009. Towards the Compilation of a New Digital Bathymetric Model of the North Atlantic Ocean, Stockholm University Licentiate thesis.
- Hovem, J.M. 2007. Underwater Acoustics: Propagation, Devices and Systems, *Journal of Electroceramics*, 19(4):339-347.
- Huff, Lloyd C. and Guy T. Noll, 2007. Sonar, Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, 2nd edition, pp. 321-349, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland.
- Jong, C.D. de, G. Lachapelle, S. Skone, and I.A. Elema, 2002. *Sounding Methods, Hydrography*, 1st Edition, Delft University Press, 363pp.
- Kearns, Timothy and Lindsay MacDonald, 2008. *LiDAR Bathymetry, Laser Applications in Environmental Monitoring*, Nova Publishers, pp. 95-130.
- Klein, E., 1968. Underwater Sound and Naval Acoustical Research before 1939, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.43, pp.931-947.
- Lockhart, C., D. Lockhart, and J. Martinez, 2008. Comparing LiDAR and Acoustic Bathymetry Using Total Propagated Uncertainty (TPU) and the Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator (CUBE) Algorithm, *Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference and National Surveyors Conference 2008*, 1-12.
- Lurton, X., 2002. *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*. Springer-Praxis, 258 p.
- Lyzenga, D.R., 1978. Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features, *Applied Optics*, 17(3):379-383. URL: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ao-17-3-379>, Last accessed at 26 September 2011.
- Mallet, C., and F. Bretar, 2009. Full-waveform Topographic LiDAR: State-of-the-art, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1):1-16.
- McNair, Gordon, 2010. *Coastal Zone Mapping with Airborne LiDAR Bathymetry*. Norwegian University of Life Sciences Department of Mathematical Sciences and Technology Master Thesis.
- Morang, A., R. Larson, and L. Gorman, 1997. Monitoring the Coastal Environment; Part III: Geophysical and Research Methods. *Journal of Coastal Research*, 13(4):1064-1085.
- NOAA, 2010. Ocean Explorer, URL: <http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/04deepscope/background/deeplight/media/diagram3.html> (Last visited at 2011/6/16)
- Penny, M. F., R. H. Abbot, D. M. Phillips, B. Billard, D. Rees, D. W. Faulkner, D. G. Cartwright, B. Woodcock, G. J. Perry, P. J. Wilsen, T. R. Adams and J. Richards, 1986. Airborne Laser Hydrography in Australia, *Applied Optics*, 25(7):2046-2058.
- Schnurr, Dan, 2010. Results of the New Calibration Tool for Hawk Eye II on Recent Projects. Presented at 11th JALBTCX Coastal Mapping & Charting Technical Workshop at Mobile, AL. Smith, W.H., and D.T. Sandwell, 1994. Bathymetric Prediction from Dense Satellite Altimetry and Sparse Shipboard Bathymetry. *Journal of Geophysical Research-All Series*. 99: 21,803-21,804.
- Tulldahl, M., 2006. Depth Sounding LiDAR Model with Multipixel Receiver. Systems Technology, FOI-Swedish Defense Research Agency Technical Report, pp. 1-24.
- Tulldahl, M., M. Andersson, and O. Steinvall, 2000. Airborne Laser Depth Sounding: Improvements in Position and Depth Estimates by Local Correlations for Sea Surface Slope, *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS 2000*, 2:1421-1428.
- USACE, 2002. *Engineering and Design Hydrographic Surveying: EM 1110-2-1003*, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington D.C., URL: <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-2-1003/>, Last accessed Sep 26, 2011
- Vine, A. C., 1972. *Oceanographic Data*, American Institute of Physics Handbook, 3rd Edition, pp. 2-119-2-132, McGraw-Hill, New York.
- Wagner, D.J., 1999. The Speed of Light and the Index of Refraction, <http://www.rpi.edu/dept/phys/Dept2/APPhys1/optics/optics/node4.html>, last accessed on March 16, 2012.
- Wei, Y., Li, H., Lu, D., and Zhu, R., 2010. Dynamic Calibration for Multi-beam Bathymetric System

Based on Characteristic Data Processing, Proceedings of 2010 IEEE International Conference, Information and Automation (ICIA), pp. 1548-1552.

Zilkoski, David, 2002. Vertical Datums. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, 1st Edition, pp. 35-60, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland.

An Investigation toward Sounding Method and Theory

Shiahn-Wern Shyue ^{1*} Tian-Yuan Shih ² Chai-Yung Hsu ³

ABSTRACT

Navigation requirement speeds up people's activity to ocean exploration, from manual lead line survey to echo sounding, methods of sounding improving with time. Such as sonar transport energy by sound wave and airborne bathymetric LiDAR uses doubled frequency green laser to penetrate water. In the past, bathymetric chart can be surveyed by means of echo sounder; laser scanning applications in shallow water expands the coverage of depth measurement without limitation of operational safety. In this article, shipborne sonar and airborne bathymetric LiDAR is investigated and their theory and operation method are introduced.

Keywords: Sonar, Airborne LiDAR Bathymetry, water depth

¹ Associate Professor, National Sun Yat-sen University, Department of Marine Environment and Engineering

² Professor, Disaster Prevention & Water Environment Research Center, National Chiao Tung University

³ Project Assistant, Natural Hazard Mitigation Research Center, National Chiao Tung University

*Corresponding Author, Phone: 886-07- 5252000 ext.5167, E-mail: swshyue@faculty.nsysu.edu.tw

Received Date: Dec. 29, 2011

Revised Date: Feb. 16, 2012

Accepted Date: Mar. 19, 2012

測深光達波形與水深、底質關係觀察

林暉尊¹ 史天元^{2*} 張智安³

摘要

測深光達(Bathymetric Lidar)以近紅外光及綠光之雷射掃描方式進行水域之水深及水底地形量測，藉由偵測水面及水底之回波時間間距求得空間距離以達探測水深效果。本研究使用東沙及澎湖之 AHAB HawkEye IIb 掃描數據及 Coastal Survey Studio(CSS)軟體進行數據分析，以水面定義、水質濁度、底質種類及地形影響各方面進行探討，比較項目包含水深、信噪比量化數據，以及搭配相機影像判識之底質種類等差異。實驗結果顯示，由於 HawkEye IIb 系統對綠光訊號之時變增益處理，水深對波形狀態影響不顯著；混濁水質造成水體中有較強散射訊號，淺水區水面及水底訊號間衰減現象較不顯著，而於深水區域甚至可能無法測得水底回訊。波形狀態呈現則與陸域光達類似，波形強度受反射面材質影響，且反射面幾何形態亦造成波形寬度改變。依本文探討 CSS 軟體成果對應接收波形，盼作為未來測深光達波形處理時回波偵測、點雲分類等作業之參考。

關鍵詞：測深光達、波形

1. 前言

空載光達系統，包含直接地理對位(Direct-Georeferencing)系統與雷射掃描系統兩大部分。其中，直接地理對位系統整合全球定位系統(Global Positioning System, GPS)、慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)，提供載台位置與姿態；雷射掃描系統則包含雷射測距與掃描機制，獲取目標物之回波訊號。整合諸項，可獲得掃描區域地形及地物資訊。

空載光達系統依掃描目標可區分為陸域光達(Topographic Lidar)及測深光達(Bathymetric Lidar)。空載陸域光達針對陸地區域以近紅外波段進行掃描，獲取地表資訊；空載測深光達則針對水體覆蓋區域以綠光及近紅外波段進行掃描，獲取水深、水底地形及底質資訊。比較空載測深光達及船載聲納(Sonar)探測方法，雖然空載測深光達穿透能力較差，但空載測深光達在水淺多礁、船行不便之處，具有施測快速及安全優勢。

陸域光達之雷射掃描系統多使用波長為1064nm 的近紅外光波段。由於近紅外光波段無法有效穿透水體，測深光達多採用經倍頻後，波長為532nm 之綠光為主要測量雷射光。在可見光波段範圍內，討論波長及穿透水體能力，如圖1所示，藍光在於開放海域最深可達200公尺穿透能力，綠光在近海沿岸海域因有較豐富水中懸浮物，其穿透深度可達50公尺(NOAA, 2010)，因此測深光達之雷射光以藍綠光為主。

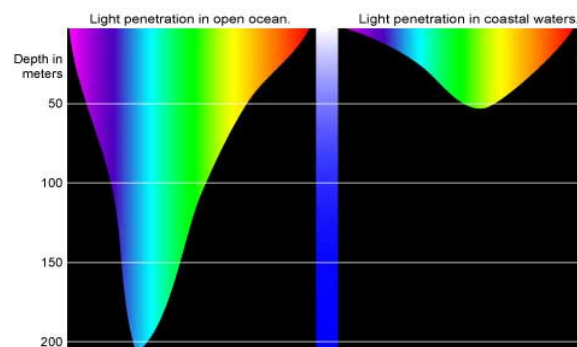


圖1 不同色光於開放海域及近岸水體之穿透能力 (NOAA, 2010)

¹ 交通大學土木工程學系測量及空間資訊組 博士生

² 交通大學防災與水環境研究中心 教授

³ 交通大學土木工程學系 助理教授

*通訊作者，電話：03-5712121 ext. 54940, E-mail: tyshih@mail.nctu.edu.tw

收到日期：民國 101 年 02 月 26 日

修改日期：民國 101 年 04 月 02 日

接受日期：民國 101 年 06 月 04 日

理論上，綠光雷射可接收自水面及水底回訊，因此單一波段即可提供足夠資訊。實際上，綠光的水面回訊(Surface Return)較強，該部分會與水體散射(Volume Backscatter)回訊重疊，造成水面位置難以精確定義，圖 2 為一典型綠光雷射之回波訊號。另一方面，若水面較為平靜，雷射至水面之足跡範圍內反射回訊號接收器之總分量較小，水面回訊可能過於微弱以致於無法偵測(Guenther, 1985)。在此情況下，判斷水面位置容易產生錯誤，因此多數空載測深光達系統以綠光波段提供水底回訊。比較綠光及近紅外光，紅外光不具有穿透水體之能力，其主要訊號為水面及其上方物體之回訊，可作為水面位置定義，惟該波段可能受水面浪沫(Whitecap)、海鳥等影響，易造成水面誤判(史天元, 2010)。

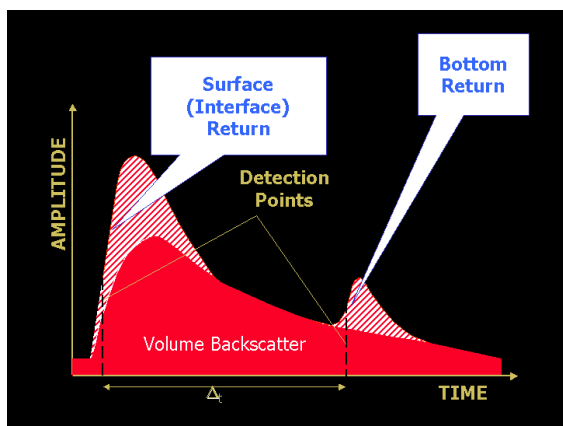


圖 2 綠光回訊波形示意(Guenther, *et al.*, 2000)

AHAB HawkEye IIb 測深系統使用偏極化之紅外光接收頻道，同時接收正交(Ortho)及平行(Parallel)回訊，以增加區分能力。但是，紅外光對浪花(White Water)現象處理能力有限，因此，除了紅外光及綠光兩個波段外，AHAB HawkEye IIb 同時接收紅光波段。紅外光及綠光波段為系統主動發射，而紅光則為拉曼散射(Raman Scattering)所形成。綠光與水之氫氧鍵經由非彈性碰撞會產生波長約 650nm 之紅光散射，此種非彈性散射(Inelastic Scattering)即為拉曼散射。拉曼散射波段屬於接近水面之水體散射，訊號穩定、變化不大，可提供近水面回訊時間，亦可作為定義水面位置之用。

AHAB HawkEye IIb 測深系統之綠光波段可分為淺水波段(shallow channel)及深水波段(deep

channel)，而回波訊號之接收器包含雪崩光檢測器(Avalanche Photodiodes, APDs)及光電倍增管(Photomultiplier Tube, PMTs)，因此 AHAB HawkEye IIb 測深部分共有紅外光、拉曼紅光、淺水及深水綠光訊號，共四個回波訊號。

本研究將以 AHAB HawkEye IIb 掃描澎湖及東沙地區之測深數據進行波形分析，依不同回訊、水質、底質特性進行分析比較，分析內容包含不同回訊偵測水面成果比較、不同水質濁度偵測水深成果比較、及不同底質濁度偵測水深成果比較。

2. AHAB HawkEye IIb 測深光達系統介紹

AHAB 公司為由 SAAB 公司獨立出來成立，承續 SAAB 在測深光達上之研發，HawkEye IIb 為其目前最新產品。與 Optech Shoals(Optech, 2012)及 Fugro LADS(Fugro, 2012)系統相同，HawkEye IIb 測深部分發射之雷射波有波長 1064nm 紅外光及波長 532nm 綠光兩個波段(LaRocque, *et al.*, 2004)，而 HawkEye IIb 接收頻道則有紅外光、拉曼散射回訊、及綠光，其中綠光波段依不同光檢測器接收訊號，又分為淺水波段及深水波段。淺水波段回訊由雪崩光檢測器接收，為體積較小二極體感器，其具有高接收靈敏度，低增益強度時具有較佳雜訊比呈現，增益值約為 50-100；深水波段回訊由光電倍增管取得，此感器具有高增益及大接收強度範圍之優點，增益值可至 106。

如圖 3 所示，該圖中 HawkEye IIb 之兩綠光回訊訊號皆經過時變增益(Time-varied Gain, TVG)處理，即給予訊號增強值隨時間變化，如紅色曲線所示。TVG 處理主要目的在於彌補傳遞過程的能量損失以及不同距離造成訊號強度之差異，常使用 TVG 函數為如式 (1) 形式 (Moszynski and Stepnowski, 2002)。增益強度與時間依公式(1)關係呈現如圖 4 藍色曲線所示，增益值縱軸以分貝(dB)為單位隨橫軸之時間增加而增強，藉以彌補圖 4 中綠色曲線表示之能量傳遞損失。

$$g(t) = (ct/2)^2 e^{\alpha_0 ct/2} \quad (1)$$

其中， $g(t)$ 為時變增益值； t 為時間； c 為速度；及 α_0 為吸收常數(absorption coefficient)。

時變增益處理目的在於增強水底回波訊號，並補償不同水深造成訊號衰減之差異，但亦可能將雜訊及較強之非水底回訊放大而造成誤判。在計算水深時，兩綠光波段之使用原則是選擇訊號品質較佳者，即以信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)作為選用方式。

HawkEye IIb 與 Fugro LADS 系統採用二維雙方向方形掃描不同，HawkEye IIb 系統採用一維掃描方式，同時，為期雷射光束有最大比例能量穿透

水體，雷射光之入水角度設計為 19 度前傾，以降低在水面之鏡面反射，並使雷射光入水後衰減能量降低 (Axelsson, 2010)，其掃描軌跡呈弧形。HawkEye IIb 另一個特色為採用「分離像元」(Split Pixel)方法，在每一個發射之雷射光束足跡內，可分別接收不同空間位置之回訊。單一束綠光雷射於水面形成約 2 公尺直徑足跡(footprint)，足跡內包含 4 個像元(pixel)，如圖 5 所示，分別對應不同空間位置。因此，藉此可增加空間解析度(Tullduahl, 2006)。

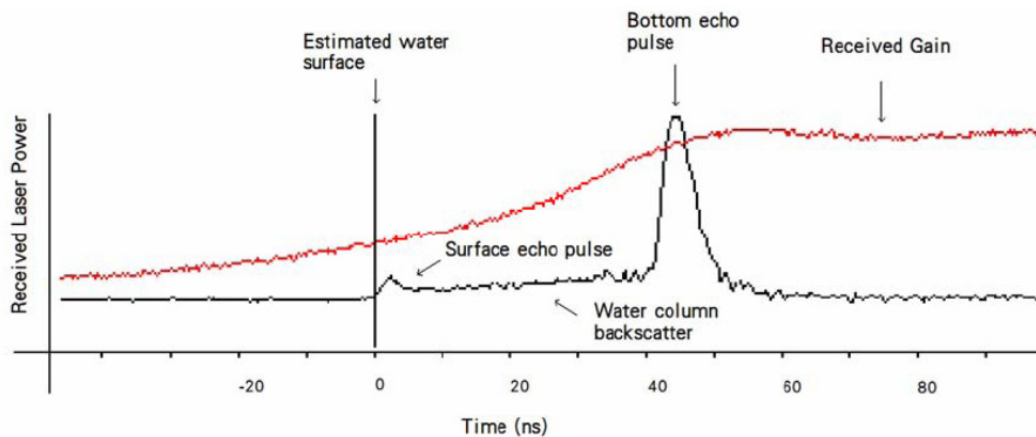


圖 3 HawkEye II 綠光波形時變增益示意圖(Liu, 2010)

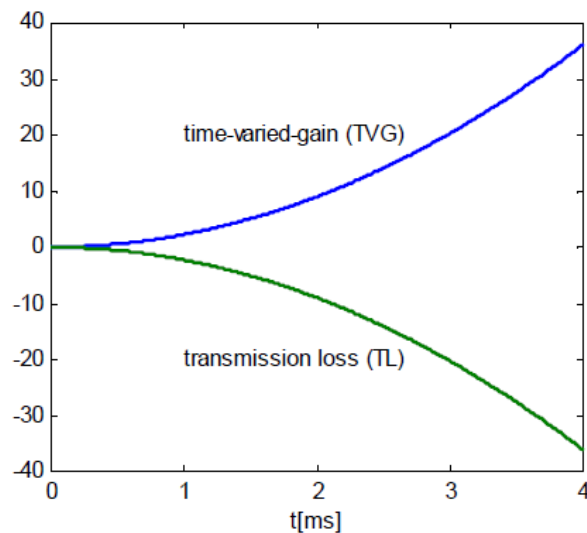


圖 4 時變增益與訊號傳遞損失示意圖(Moszynski and Stepnowski, 2002)

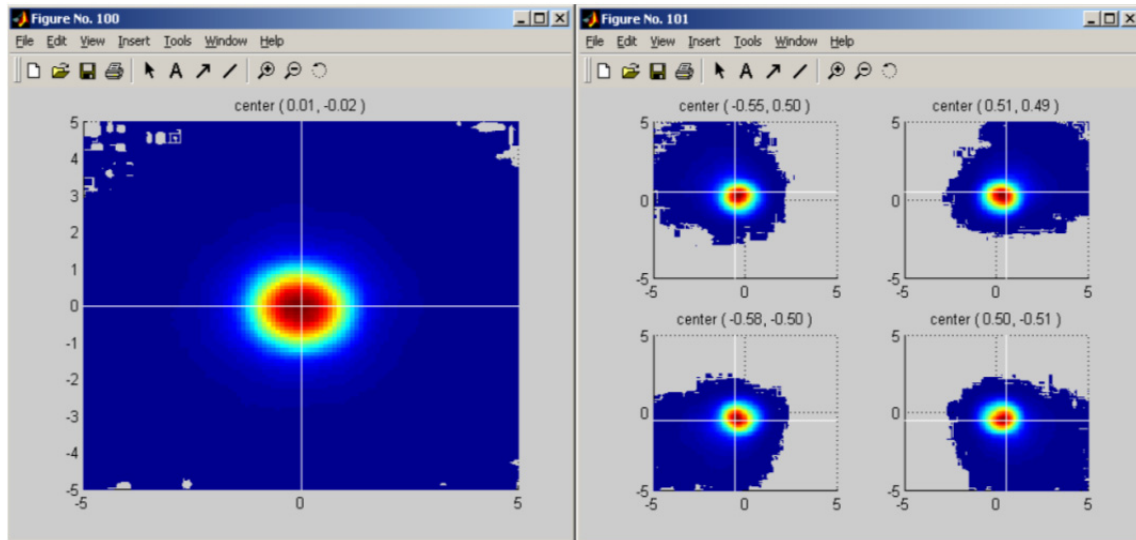


圖 5 Split Pixel (Hobson, 2005)

3. 波形分析

測深光達使用雷射掃描技術，接收水面、水體及水底之回波訊號。經波形分析偵測水面及水底之回訊時間，由雷射光在水的行進時間及回訊時間差，計算空間距離，經過入射角幾何換算可求得水深。由於回波訊號來自水面、水體及水底物質，因此訊號可能受水面、水質、底質、水底地形等條件影響而有所差異。

本研究將探討不同回訊、水質、底質三個因素於水面及水深之偵測，利用 HawkEye IIb 測深光達系統數據及其作業時搭配相機影像為輔助，探討不同環境條件案例展示光達波形資料，測試區為澎湖及東沙地區(史天元，2011)。研究中採用 CSS(Coastal Survey Studio)軟體處理結果如水深、信噪比等進行波形分析(Isaksson, 2009)，主要分析工作包含：(1)比較不同回訊偵測水深成果，(2)比較不同水質濁度偵測水深成果，(3)比較不同底質濁度偵測水深成果。以下就各分析項目進行說明。

3.1 比較不同回訊偵測水深成果

HawkEye IIb 的每一個綠光雷射光束可記錄 4 個回波，亦可經後處理將 4 個回波合組一個組合波形(Composite)，這 4 個回波分別標注為 pixel 0、

pixel 1、pixel 2 及 pixel 3。本研究分別使用同一光束的 4 個回波及其合成波形進行波形分析，分析目的是比較單一光束不同回波於水面及水深之偵測成果，由於綠光波段可穿透水體，其回訊包含水面及水底部分，然而水面部分可能因反射訊號較弱造成無法偵測。

研究中挑選測區中之一組回波訊號(共 4 個像元)進行分析，圖 6 為單一綠光雷射光束 4 個像元(pixel 0~pixel 3)及其組合波各別之淺水及深水波段訊號，其中縱向實線表平均水面時間，縱向虛線則為系統偵測得到水面及水底回波時間點，該些時間點皆由 CSS 軟體所偵測。經由實驗分析，測區的 pixel 0 及 1 未偵測得水面回訊，而 pixel 2 及 pixel 3 僅淺水波段訊號具有水面回訊(圖 6(c)(d)黃框內)。

圖 7 為此綠光雷射光束對應之紅外光及拉曼紅光訊號，其中黃色曲線為紅外光訊號，藍色曲線為拉曼紅光。該綠光雷射各像元接收波形偵測得時間如表 1 所示，X 表示系統未能偵測出水面時間位置；此區域 4 個像元位置所計算而得的水深約為 4.4334 至 4.5795m，水面及水底時間差約為 40.56 至 42.08ns，由於各像元間對應空間位置接近而具有相似水體狀態，其各像元水深差異小於 0.15m。

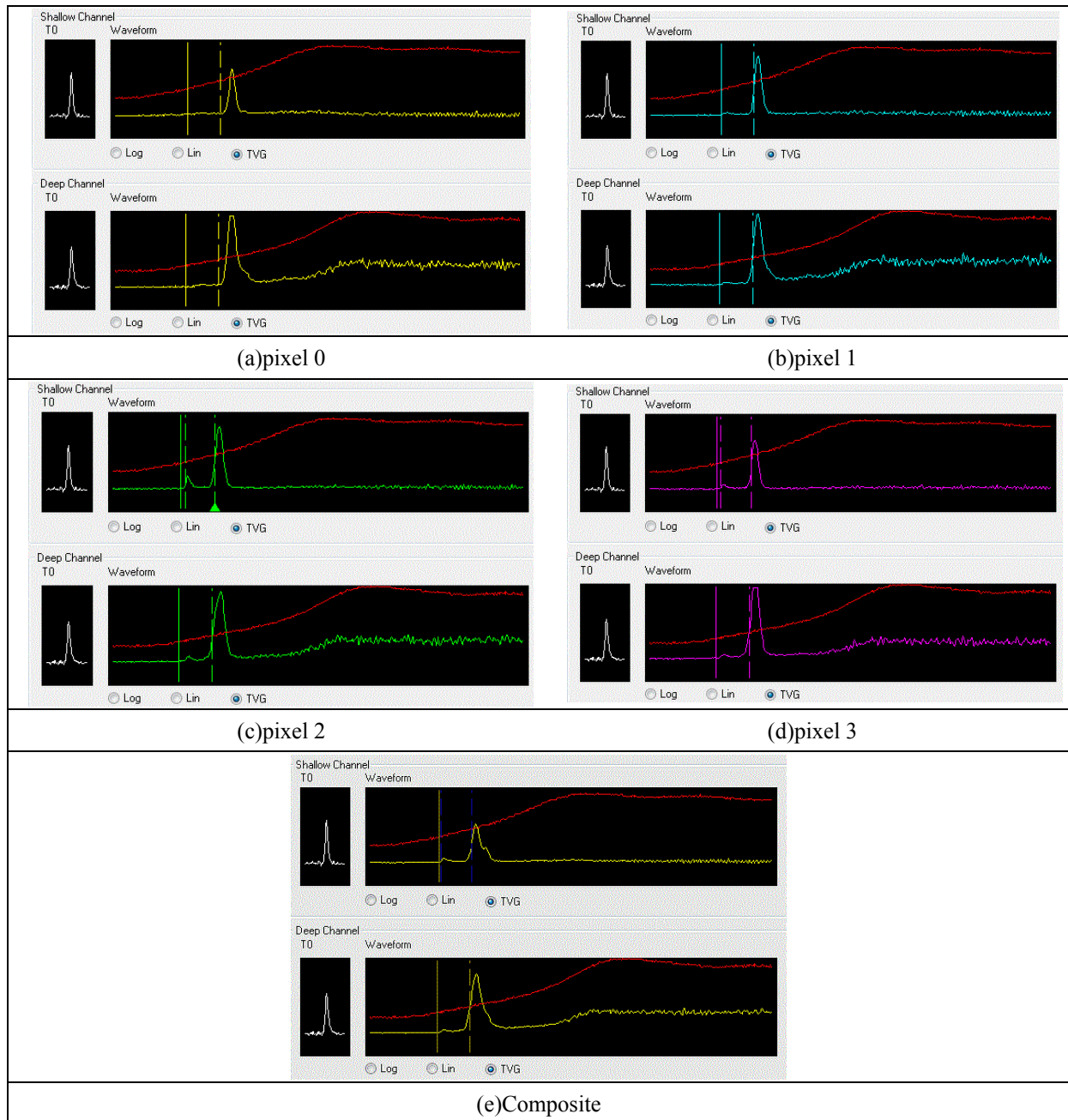


圖 6 單一綠光雷射光束中 pixel 0~pixel 3 與 Composite 訊號
(紅色曲線為該雷射訊號之 TVG 函數)

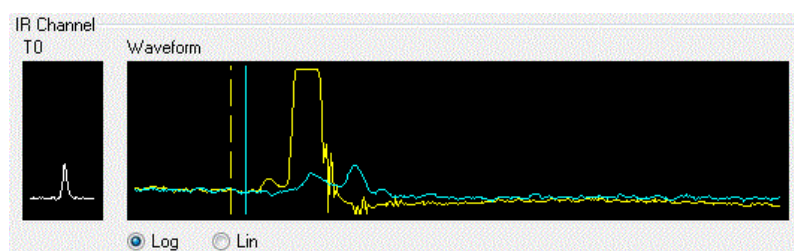


圖 7 紅光及紅外光回訊波形
(黃色曲線為紅外光訊號，藍色曲線為拉曼紅光)

表 1 接收各像元訊號測得水面、水底時間及計算水深值

單位：ns		Mean Surface	Surface Time	Bottom Time	Depth(m)
IR		2955.977295	2944.637207	X	
Raman		2955.977295	2956.104736	X	
Pixel0	Shallow	2959.360107	X	3000.136719	4.4334
	Deep	2957.332031	X	2997.380859	
Pixel1	Shallow	2957.852295	X	2999.000977	4.4750
	Deep	2955.824219	X	2997.126709	
Pixel2	Shallow	2952.649170	2958.065674	2993.803467	4.4801
	Deep	2950.621094	X	2991.241211	
Pixel3	Shallow	2954.151611	2958.400146	2996.23193	4.5795
	Deep	2952.123291	X	2993.913330	
Composite	Shallow	2955.977295	2958.297363	2996.860840	
	Deep	2953.948975	X	2994.513672	

3.2 比較不同水質濁度偵測水深成果

雷射光束穿透水體過程會不斷產生水體散射，在訊號上之反映即為水面回訊後呈現的訊號值緩慢衰退(見圖 2)。水體中若帶有懸浮物體，則呈現回訊波形於入水後將有非穩定衰減現象。比較相同深度不同水質濁度之回波訊號，圖 8 及 9 分別為低訊雜比及高訊雜比之回波，訊雜比越低代表其濁度越高。圖 8 為掃描於澎湖沿岸海水帶有較多懸浮物之綠光波段訊號範例，此測點水深 8.104m，最終使用淺水波段作為水底時間偵測，該訊號信噪比為 4.514，波形呈現於入水後仍有穩定回訊直至水底回波。對應相當深度測點，以東沙地區水質清澈測區比較(如圖 9)，測點水深 8.391m，使用淺水波段偵測水底時間，其信噪比為 39.442，波形於水底反射前無顯著訊號反應。

接著，以水深較深區域進行水質對波形之影響分析，以澎湖及東沙地區測點深度約略 24m 之波形(圖 10、圖 11)觀察其差異。澎湖測點水深 24.449m，以深水波段作為水底時間偵測，其信噪比為 4.244，淺水波形未測得水底回訊，而深水波段回訊可觀察得知其較為不明確且帶有明顯雜訊；東沙測點水深 24.625m，仍使用淺水波段偵測水底時間，信噪比

34.495，此時淺水及深水波段皆可測得水底時間，且由於時變增益效應，水底回訊強度並未受深度較深影響而明顯衰退。

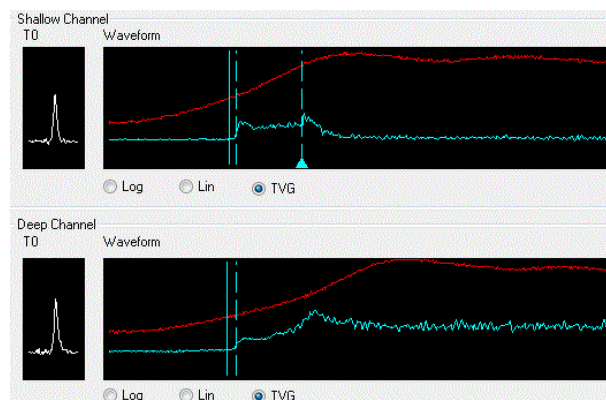


圖 8 水質混濁綠光波形範例-1

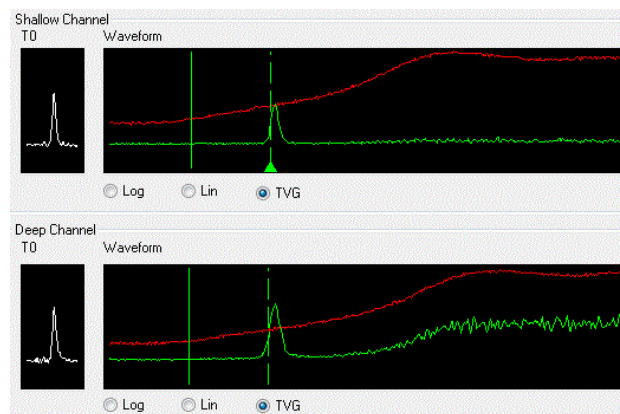


圖 9 水質清澈綠光波形範例-1

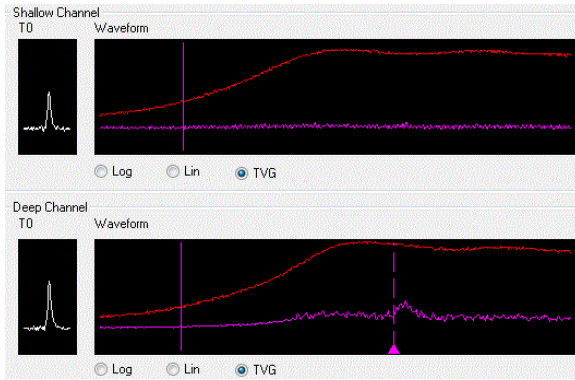


圖 10 水質混濁綠光波形範例-2

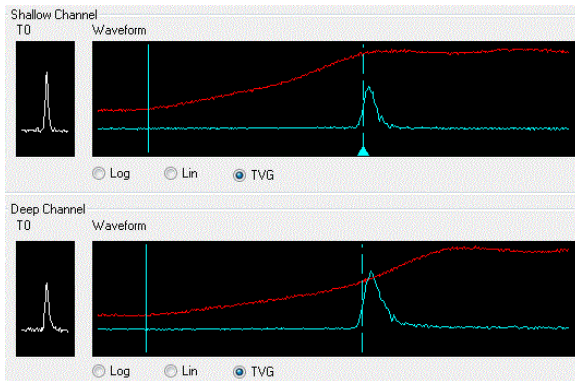


圖 11 水質清澈綠光波形範例-2

3.3 比較不同底質濁度偵測水深成果

不同反射面對於照射光線之吸收與反射比率皆有所差異，因此對應於測深光達之波形訊號，水底底質種類亦為一項影響波形型態之因素(Wang and Philpot, 2007)。研究中分別選取淺色砂質底質及深色帶有藻類底質之綠光訊號進行比較，測試區為東沙地區，其測深光達搭配相機之影像如圖 12 所示。淺色砂質底質及深色藻類底質之綠光回波訊號分別如圖 13 及圖 14 所示。淺色底質測點水深 3.833m，使用淺水波段偵測水底回波，其信噪比為 53.418；深色藻類覆蓋底質測點水深 3.825m，使用淺水波段偵測水底時間，其信噪比 18.091。水深相當之條件下，由波形中水底回訊部分可觀察到淺色底質有較強訊號強度，信噪比亦是以淺色底質明顯高出許多。

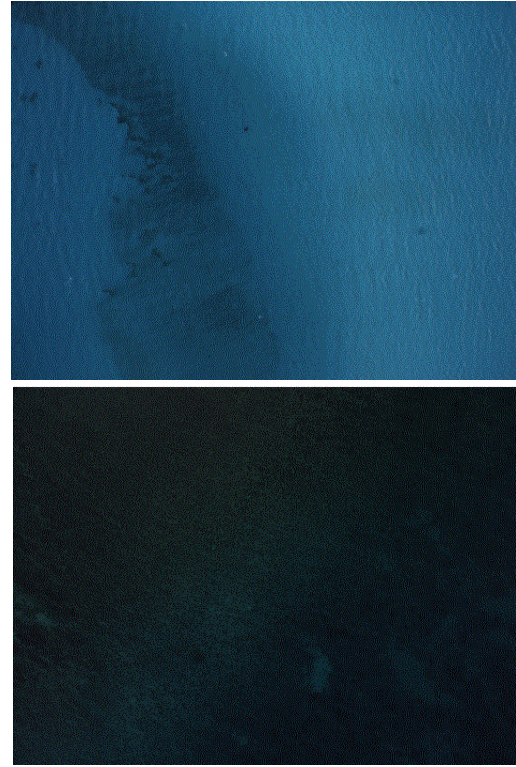


圖 12 淺色砂質底質(上)及深色藻類覆蓋底質(下)影像

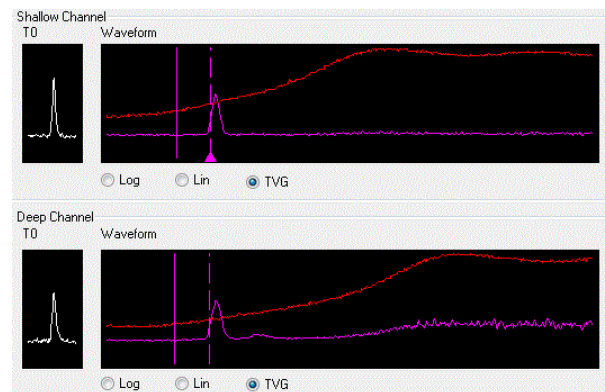


圖 13 淺色底質綠光波形範例

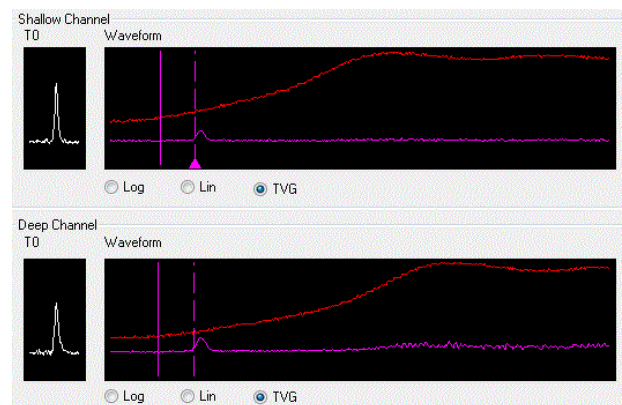


圖 14 深色藻類覆蓋底質綠光波形範例

除底質種類外，水底地形形態亦可能影響波形特徵，如同陸域全波形光達掃描時足跡內具有高差或為傾斜面時，造成多偵測多回波或波形拉伸現象。選取東沙地區掃描於珊瑚礁礁塊側邊之測點(圖 15 黃圈處)，由深水波段波形偵測水底時間，則測得兩個回波時間(如圖 16)，且波寬較大。

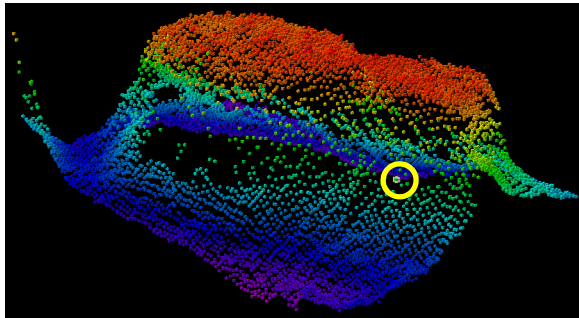


圖 15 礁塊側邊選取掃描點

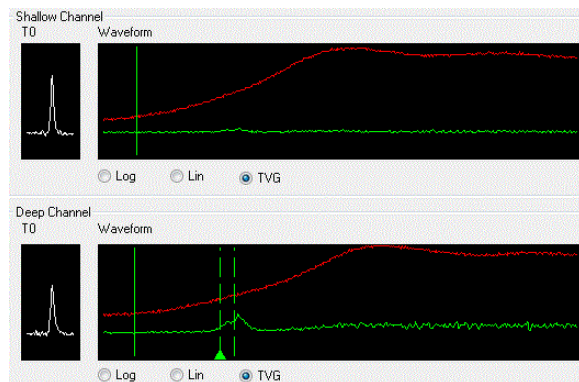


圖 16 礁塊側邊掃描點造成綠光波段多水底回訊

4. 結論

空載測深光達波形形態受諸多施測地區條件影響，本文以 HawkEye IIb 綠光波段為主要探討對象，由改變水面定義、水深、水質、底質及水底形態等變因觀察波形差異。除環境條件外，系統本身對波形儲存及處理方式不同亦會影響最終波形呈現，本文僅就 HawkEye IIb 系統所記載波形作為探討案例，歸納實驗分析結論如下：

1. 受水面狀態之影響，綠光波段於水面反射可能無法偵測；水深於此處影響波形狀態並不顯著，是由於 HawkEye IIb 掃描系統對於綠光波形訊號經時變增益處理，致使水深較深時訊號衰減受到補償。

2. 水質對波形影響主要於水體散射部分，由於水體中含有懸浮物會造成較強之訊號反射，水面及水底反射回訊間衰減現象較不顯著。另外，在水質較混濁的情況下，此時光達可量測水深將受限，深水之訊號於穿透水體過程中受較多雜質影響，水底回訊則較不易測得。
3. 水底影響分為底質種類及水底地形形態。底質種類不同主要反應於回訊強度上，由於反射強度取決於反射面之反射率，而水底地形形態影響類似陸域全波形光達所反應不同地物形態對其波形寬度或多偵測回波之影響。

參考文獻

- 史天元、薛憲文、王慧蓉、陳杰宗、陳佳勳，2010。測深光達原理、現有系統與服務，地籍測量，29(1):44-58。
- 史天元，2011。2010 澎湖與東沙測深光達作業，以透水光達測繪技術測製東沙地區數值地形模型工作成果發表會，新竹市，交通大學。
- Axelsson, A., 2010. Rapid Topographic and Bathymetric Reconnaissance Using Airborne LiDAR, Proceedings of SPIE, Vol. 7835, pp.3-12.
- Fugro, 2012. Fugro LADS, <http://www.fugrolads.com/about-lads/>, last accessed on June. 02, 2012.
- Guenther, G.C., 1985. Airborne Laser Hydrography. System Design and Performance Factors, NOAA Professional Paper Series, 1. Rockville, Md: U.S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Guenther, G. C., Cunningham, A. G., LaRocque, P. E., and Reid, D. J., 2000. Meeting the Accuracy Challenge in Airborne Lidar Bathymetry, Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, Dresden/FRG, June 16 - 17, 2000.
- Hobson, P., 2005. Effective Surveying in the Coastal Zone & Beyond, Shallow Survey 2005.
- Isaksson, A., 2009, Coastal Survey Studio Mark II Manual Version 2.X, Airborne Hydrography AB.
- LaRocque, P. E., Banic, J. R. and Cunningham, A. G., 2004. Design Description and Field Testing of the SHOALS-1000T Airborne Bathymeter, SPIE conference, Orlando Florida, April 13 -15, 2004.
- Liu, X., Tulldahl, H. M., and Axelsson, A., 2010. Bathymetry LiDAR Reflectance Processing and Seafloor Classification. Proceeding of European LiDAR Mapping Forum, Netherlands, 30 Nov. -

- 1 Dec., 2010
- Moszynski, M., and Stepnowski, A., 2002. Time-varied Gain Correction for Digital Echosounders, <http://webistem.com/acoustics2008/acoustics2008/cd1/data/fa2002-sevilla/forumacusticum/archivos/unw01022.pdf>, last accessed on Feb. 08, 2012.
- NOAA, 2010. Ocean Explorer, <http://oceanexplorer.noaa.gov>, last accessed on Jun. 16, 2011.
- Optech, 2012. SHOALS - Technical Overview and Specifications, <http://www.optech.ca/shoalssys.htm>, last accessed on June. 02, 2012.
- Tulldahl, M., 2006. Depth Sounding LiDAR Model with Multipixel Receiver. Systems Technology, FOI-Swedish Defense Research Agency Technical Report, pp. 1-24.
- Wang, C-K., and Philpot, W. D., 2007. "Using Airborne Bathymetric Lidar to Detect Bottom Type Variation in Shallow Waters" , Remote Sensing of Environment, Volume 106, Issue 1, pp. 123-135.

Exploration on Waveforms of Bathymetric Lidar

Wei-Tsun Lin ¹ Tian-Yuan Shih ^{2*} Tee-Ann Teo ³

ABSTRACT

Bathymetric Lidar uses near infrared and green band lasers to acquired the water depth and underwater topography. The spatial distance can be estimated from the return signals of the surface and the bottom of water. Dongsha and Penghu are the test areas. The test data are acquired by AHAB HawkEye IIb and processed by Coastal Survey Studio (CSS) software. This study analyses the surface definition, water turbidity and bottom topography. The quantitative analysis includes water depth, signal-to-noise ratio and types of sea bottom. The experiment indicates that depths affected by waveform appearances are not obvious due to the Time-varied Gain (TVG). The turbid water makes stronger volume backscatter and decreases the attenuation effect, even leads to the bottom echo undetectable with deeper water. Waveform appearance is varied with types of reflective material and geometry, as well as influencing the strength and pulse width, respectively. This study analyses the relationship between waveform acquired by HawkEye IIb and results processed by CSS software. The experimental results may provide some evidences for further processing such as bathymetric Lidar echo detection, point cloud classification, and others.

Keywords: Bathymetric Lidar, Waveform

¹ PhD student, Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University

² Professor, Disaster Prevention & Water Environment Research Center,
National Chiao Tung University

³ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University

* Corresponding Author, Phone: 886-3-5712121 ext. 54940, E-mail: tyshih@mail.nctu.edu.tw

Received Date: Feb. 26, 2012

Revised Date: Apr. 02, 2012

Accepted Date: Jun. 04, 2012

投稿注意事項

本學刊出版有關航空測量、遙感探測、及相關應用科學之學術論著、技術短文及學術與應用性報導。所收稿件將送兩位以上相關之專家學者審查，審查時將依照文章之水準、長度及特性向編輯委員會作適當之推薦。學術論著及技術短文均需依本注意事項之規定，技術短文之形式與學術論著相似，惟技術短文內容較技術性，作者需自行申明文稿之類別。投稿件請盡量以電子郵件方式寄送（WORD 檔及 PDF 檔各一份）予總編輯，投稿信箱地址如本刊封面內頁所示。為便利編審及出版作業，請於稿件 WORD 檔中提供聯絡作者之電話號碼及電子郵件信箱，而稿件 PDF 檔則請移除作者相關資料，如姓名、任職單位、電話、電子郵件信箱等。凡投寄之稿件不得同時投寄至其他期刊或曾於其他期刊刊登；於研討會發表過之論文，需經增補內容改寫後，方可向本刊投稿。稿件如經接受，校對工作由作者負責。本刊無稿酬，出版後將寄送作者抽印本 PDF 檔一份。

稿件撰寫格式要點：

- 一、文字：內容以中文或英文撰寫。應附中文及英文摘要，字數各不得超過 250 字為限。
- 二、單位：所有含因次之量須採用 SI 單位公制。
- 三、打字：(1)中文稿件均須用白紙以新細明體橫式打字、內文字體大小為 10。(2) 英文稿件均須用白紙以 Times New Roman 橫式打字、內文字體大小為 11。(3)用紙大小 21 公分 x30 公分(A4 規格)為準。(3)檔案格式為(word 檔)並請隨文稿附送電子檔。
- 四、題目：論文題目宜簡明，英文題目每字第一位字母以大寫字體打印。
- 五、作者：作者姓名列於論文題目之下方，其服務機關及職稱以^{1,2,...}上標編號註記首頁末。
- 六、關鍵詞：在題目中須選出中文及英文三至五個關鍵詞，並置於摘要下方空二行之靠左位置。
- 七、首頁及末頁排列格式：
 - (1)中文稿件之首頁排列依次為「題目、作者姓名、摘要、關鍵詞、論文主題、作者服務機關及職稱」。中文稿件之末頁為英文之題目、作者姓名、摘要、關鍵詞及服務機關(論文內容免列)。
 - (2)英文稿件之首末頁格式與中文稿件相似，但中文、英文互換。
- 八、章節及標題：(1)章節標題須列於稿紙之中央對稱位置，且加編號，字體大小為 18；編號一律為阿拉伯數字，如 1, 2, ...。(2)小節標題亦加編號，但必須從文稿之靠左開始，字體大小為 16；編號一律為 1.1, 1.2, 1.1.1, 1.1.2.....。
- 九、數學式：(1)所有公式及方程式均須打字以黑墨書寫清楚，其後標式號於圓括弧內。(2)為清晰起見，每一式之上下須空二列。
- 十、長度：稿件之長度(含圖)，英文不得超過 10,000 字，中文不得超過 30,000 字，或相當於 25 頁(A4 規格)之長度為標準。
- 十一、圖表：(1)稿件經通知採用後，如有插圖、照片，作者應迅速提供白紙或描圖紙上墨繪製之圖表、幻燈片(或光面照片)等原件，本刊接受彩色圖表，但以學刊二頁為限，超出之費用由作者支付。(2)所有圖表、照片必須附有編號、標題或簡短說明，並以鉛筆註明作者姓名。中文稿圖表標題須為中文，英文稿圖表標題須為英文。
- 十二、符號：文內所有符號須於符號第一次出現時加以定義。
- 十三、參考文獻：

參考文獻應列於文末，未直接引用者不得列入。在文中，參考文獻引用格式：作者為一人時，以作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)及發表年代，如李良輝(1991)或(李良輝, 1991)、Jones (1979)或(Jones, 1979)。作者為二人時，以二作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)及發表年代，如施學延、陳良健(2011) 或(施學延、陳良健, 2011)、Jones & Smith (1979)或(Jones & Smith, 1979)。作者為多人時，以第一作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)，之後加「等」(中文文獻)或「et al.」(英文文獻)及發表年代，如(郭寶章等, 1976)或郭寶章等(1976)、Jones et al. (1979)或(Jones et al., 1979)。作者及發表年代完全相同時，依日期在年代後加以 a, b, c 引用，如 Jones & Smith (1979a)、Jones & Smith (1979b)。

文末之參考文獻項目，排列之秩序為：參考文獻先排列中文部分，英文參考文獻列於中文參考文獻之後，其他文字參考文獻列於英文參考文獻之後。中文參考文獻以第一作者姓名筆劃順序排列，英文參考文獻以第一作者之姓依英文字母順序排列。當作者相同時，依發表年代排列，作者及發表年代完全相同時，依日期在年代後加以 a, b, c 順序。第一作者姓名相同時，先排列單一作者之參考文獻，其次為多作者文獻。文獻排列之格式為：

- 1.期刊文獻：作者姓名，發表日期。文章標題，期刊名稱，卷數(期數)：起始頁數—結束頁數。
- 2.書籍：作者姓名，年代。書名，出版者，出版地。
- 3.論文集：作者姓名，年代。篇名，論文集名稱，論文發表地點，卷(期)：起始頁數—結束頁數。

Instructions For Authors

It is the policy of Journal of Photogrammetry and Remote Sensing to consider theoretical, applied papers and reports addressing topics in photogrammetry and remote sensing. Manuscripts are peer-reviewed by at least two experts. Decision is made on the disposition of a manuscript, and the authors are notified of the decision.

Manuscripts need to conform to the requirements described below. Technical papers are operation oriented. Authors are requested to indicate categories of their papers.

Manuscript submission should be sent via e-mail to Editor in Chief, both in WORD and PDF formats. It is the policy of the Journal that submitted papers have never been published before. Papers published in conference proceedings are accepted with revision. Authors are responsible for proofreading during the publication process.

Subject to no payment to accepted papers, an electronic version of off-prints in PDF will be sent to authors.

1. Language: Chinese or English text with abstract less than 250 words.
2. Metric System: SI units
3. Typing: Double-spaced on one side of A4 international white paper. A Microsoft WORD document is requested with a PC formatted floppy disk.
4. Title: Titles should be short. Capitalize initial letter for English.
5. Authors: Authors names are listed below title, affiliations are listed at the end of the first page marked with ^{1, 2, ...}
6. Keywords: 3 to 5 keywords are selected from the paper and placed 2 lines below text of abstract to the left margin.
7. Cover page: In cover page, gives, subsequently, manuscript title, authors' names and affiliations, abstract, and key words.
8. Sections and Sub-sections: Centred and numbered in 1, 2... etc. for section headings. Sub-sections are justified to the left in 1.1, 1.2, 1.1.1, 1.1.2...etc.
9. Equations: Type formulae and equations clearly in black and numbered in curved brackets. Leave 2 lines blank above and below equations.
10. Paper length: Published papers are limited to 25 pages of A4 size that is less than 30,000 words in Chinese or 10,000 words in English.
11. Figures and Tables: Figures and tables are numbered and described in short. When papers are accepted, original figures, tables, and photographs are expected for reproduction. Color reproduction is limited to 2 pages.
12. Arguments: Define symbols at first appearance.
13. References: Only works cited in the text will be included. Arrange Chinese literatures first then English in references. Chinese references all located in stroke number of the first author while English references in alphabetical order. Cited references to published literature in the text by first author and date for example, Jones (1979) or (Jones, 1979), depending on sentence construction.

Volume 16 No. 3
August 2012

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

CONTENTS

Regular Issue Papers

- On The 2010 Bathymetric Lidar Survey of Penghu and Dongsha Atoll
(Tian-Yuan Shih, Shiahn-Wern Shyue, Fu-Daw Hsio, Ya-Hsing Chen,
Chai-Yung Hsu, Jie-Chung Chen, Jia-Hsun Chen).....**151**
- Distributional Characteristics of the Seagrasses Encircling the Dongsha Island
(Hsiao-Yun Sun, Chia-Ying Ko, Pei-Fen Lee).....**167**
- The Preliminary Study Of Airborne LiDAR Bathymetry On Capillary-Gravity Water
Surface Detection
(Jen-Jer Jaw, Chih-Kai Meng).....**181**
- Evaluation of Bathymetric LiDAR for Taiwan Coastal Water
(Chi-Kuei Wang, Kuei-Chia Chen, Chih-Chiao Lin).....**193**
- An Investigation toward Sounding Method and Theory
(Shiahn-Wern Shyue, Tian-Yuan Shih, Chai-Yung Hsu).....**203**
- Exploration on Waveforms of Bathymetric Lidar
(Wei-Tsun Lin, Tian-Yuan Shih, Tee-Ann Teo).....**219**

更正啓示

第十六卷一期第 81、83、85、87、89、91、93、95、97 頁頁首〈應用福衛二號影像與地面樣區資料於光蠟樹平地造林地之碳吸存推估〉一文，作者中文姓名及文章名稱應為「謝漢欽、汪大雄、王慈憶、張鈞媛、邱志明：應用福衛二號影像與地面樣區資料於光蠟樹平地造林地之碳吸存推估」誤植為「潘國樑、林彥享、黃春銘、柯傑夫、鄭錦桐、冀樹勇：小林埋村事件之還原---衛星影像判釋」，特此更正。

第 十 六 卷 第 三 期
中 華 民 國 一 〇 一 年 八 月

航測及遙測學刊

目錄

學術論著

- 澎湖與東沙環礁測深光達作業探討
(史天元、薛憲文、蕭輔導、陳雅信、徐佳筠、陳杰宗、陳佳勳).....151
- 東沙島周圍海草分布特徵
(孫筱雲、柯佳吟、李培芬).....167
- 空載測深光達於毛細波及重力波水面偵測之初探
(趙鍵哲、孟稚開).....181
- 評估應用透水光達於台灣近岸海域水深測繪
(王驥魁、陳桂嘉、林志交).....193
- 水域測深方法暨原理探討
(薛憲文、史天元、徐佳筠).....203
- 測深光達波形與水深、底質關係觀察
(林暉尊、史天元、張智安).....219