

100-25-7517

MOTC-IOT-99-H2DB008

智慧型太陽能遙控近岸測量船 之研究(2/4)



交通部運輸研究所

中華民國 100 年 4 月

100-25-7517

MOTC-IOT-99-H2DB008

智慧型太陽能遙控近岸測量船 之研究(2/4)

著者：邱永芳、郭振華、張富東、蔣敏玲

交通部運輸研究所

中華民國 100 年 4 月

國家圖書館出版品預行編目資料

智慧型太陽能遙控近岸測量船之研究(2/4)

/邱永芳等著. --初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，

民 100.04

面 ； 公分

ISBN 978-986-02-7147-8 (平裝)

1. 船舶 2. 太陽能發電 3. 導航 4. 遙感探測

444.11

100002540

智慧型太陽能遙控近岸測量船之研究(2/4)

著 者：邱永芳、郭振華、張富東、蔣敏玲

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版> 本心出版品)

電 話：(04) 26587176

出版年月：中華民國 100 年 4 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 90 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：100 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組・電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1・電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號・電話：(04)22260330

GPN：1010000350

ISBN：978-986-02-7147-8 (平裝)

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

100

智慧型太陽能遙控近岸測量船之研究
(2/4)

交通部運輸研究所

GPN:1010000350

定價 100 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：智慧型太陽能遙控近岸測量船之研究(2/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN978-986-02-7147-8（平裝）	政府出版品統一編號 1010000350	運輸研究所出版品編號 100-25-7517	計畫編號 99-H2DB008
本所主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：邱永芳 研究人員：張富東、蔣敏玲 聯絡電話：04-26587115 傳真號碼：04-26564418	合作研究/共同研究單位：國立台灣大學工程科學及海洋工程系 計畫主持人：郭振華 研究人員：馬玉龍、李定橋、邱奕倫 地址：10617 台北市羅斯福路 4 段 1 號 聯絡電話：02-33665739		研究期間 自 99 年 3 月 至 99 年 11 月
關鍵詞：無人船舶、導航定位、AIS，太陽能、路徑控制、海洋測量			
本計畫之研究目標為設計、製作與測試一具自主式無人工作小船，此無人工作船採用穩定之船型設計，利用太陽能與充電電池驅動。本計畫研究內容包含建立自主式無人船舶之精密導航定位與路徑追隨自動控制系統，以及自主式無人船舶之路徑規劃與任務控制系統設計。此工作船配備船舶自動識別系統，可形成船隊船、船對岸之無人船舶量測網路，並可攜帶多種量測儀器，自動施行港口之大範圍以及長時間定點之水深、水流剖面等資料蒐集與測量等工作，且可將資料藉由無線電波傳送至岸上之監控電腦。預期可以提升各港務局水深測量，海巡署搜救，各學術單位海岸調查，內政部國土測繪等無人遙控載具的運用與工作效率。本文為第二年之研究成果，說明無人船設計之進度，包含船舶之外型、阻力預估，以及考量測量誤差限制條件下的耐海性能設計、無人船遙控操作及導航訊號處理之構想，及無人船太陽能系統發電量對探測能力影響之評估。 本研究成果之效益及後續應用將可以提升各港務局水深測量、海巡署搜救、各學術單位海岸調查、內政部國土測繪等無人遙控載具的運用與工作效率。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
100 年 4 月	106	100	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密條件： ☐ 年 月 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Solar-powered Autonomous Surface Craft for Near-shore Marine Observation (2/4)			
ISBN (OR ISSN) ISBN 978-986-02-7147-8 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010000350	IOT SERIAL NUMBER 100-25-7517	PROJECT NUMBER 99-H2DB008
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chiu Yung-fang PROJECT STAFF: Chang Fu-tong, Chiang Ming-ling PHONE: 04-26587115 FAX: 04-26564418			PROJECT PERIOD FROM March 2010 TO November 2010
RESEARCH AGENCY: National Taiwan University PRINCIPAL INVESTIGATOR: Guo Jen-hwa PROJECT STAFF: Ma Yu-long, Li Din-chao, Chiu I-lun ADDRESS: No.1, Sec. 4, Roosevelt Road, Taipei 10617, Taiwan, R.O.C. PHONE: 886-2-33665739			
KEY WORDS: ASV, navigation, positioning, solar power, trajectory control, marine environmental monitoring			
ABSTRACT: The objective of the project is the development and integration of advanced technological systems to achieve an operation of an Autonomous Surface Craft (ASC) ensuring a fast data collecting and stable station keeping platform in a harbor and near-shore or shallow water environment. Research issues are examined including ASC design and advanced control, guidance and mission control. Functional requirements of the ASV are as follows: 1. Dynamic positioning/station keeping in water currents. 2. Navigation and control of its own position and posture. 3. Imaging and data collection using on board sensors. 4. Flexibility in choosing payload equipments. 5. Ability to work long-range and long-time by solar and battery power. 6. Interface is friendly to the operator. The analysis and design methodology developed for this project will lead to deeper understanding of ASC systems that are efficient for marine observations. The advantages are expected that, in addition to safer and less expensive than manned vehicles, this robotic vehicle can be effective for bathymetric survey, environmental monitoring and sampling, and costal defense tasks.			
DATE OF PUBLICATION April 2011	NUMBER OF PAGES 106	PRICE 100	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目 錄	III
圖 目 錄	V
表 目 錄	VIII
第一章 前 言	1-1
第二章 自主式無人船舶設計	2-1
2.1 船型設計與系統架構.....	2-1
2.2 船體阻力估算.....	2-6
2.3 耐海性能預估.....	2-9
2.4 運動控制	2-16
第三章 無人船遙控操作系統.....	3-1
3.1 參考座標	3-1
3.1.1 地球慣性座標系統.....	3-1
3.1.2 地球固定座標系統.....	3-2
3.1.3 當地水平座標系統	3-3
3.1.4 附體座標系統	3-4
3.2 延伸型卡爾曼濾波器運用於無人船定位.....	3-4
3.2.1 狀態預測	3-5
3.2.2 狀態更新	3-9
3.3 Google Maps 遙控介面	3-15

3.3.1	Google Map API.....	3-15
3.3.2	使用者網頁設計	3-16
第四章	無人船太陽能發電量與探測能力	4-1
4.1	電力系統.....	4-1
4.1.1	太陽能電池	4-1
4.1.2	鋰離子電池	4-5
4.1.3	負載計算	4-6
4.2	太陽能發電系統模擬.....	4-9
4.3	無人船電力消耗.....	4-16
第五章	結論與建議	5-1
5.1	結論	5-1
5.2	建議	5-2
5.3	成果效益與後續應用情形.....	5-2
參考文獻		參-1
附錄一	期中報告審查意見處理情形表	附 1-1
附錄二	期末報告審查意見處理情形表	附 2-1
附錄三	期中簡報資料	附 3-1
附錄四	期末簡報資料	附 4-1

圖 目 錄

圖 2.1 無人船外形及硬體配置	2-3
圖 2.2 無人船的座標系及主要尺度	2-3
圖 2.3 設計船型剩餘阻力係數	2-6
圖 2.4 設計船型摩擦阻力係數	2-6
圖 2.5 設計船型總阻力係數	2-7
圖 2.6 模擬與自航試驗總阻力係數比較	2-9
圖 2.7 不同波浪情況下對起伏運動的影響	2-10
圖 2.8 不同波浪情況下對縱搖運動的影響	2-11
圖 2.9 不同波浪情況下對橫搖運動的影響	2-11
圖 2.10 船體起伏、縱搖與橫搖導致測深結果的誤差	2-13
圖 2.11 水深 15 公尺船體運動導致測深誤差與水深比與波浪週 期、波高之關係	2-14
圖 2.12 無人船之 90°方向角改變控制數據.....	2-17
圖 2.13 無人船之 180° 方向角改變控制數據.....	2-17
圖 2.14 波高= 14 公分, 週期 = 1 秒,頂浪下之無人船運動數據.....	2-19
圖 2.15 波高= 14 公分, 週期 = 1 秒,側浪下之無人船運動數據.....	2-20
圖 2.16 波高= 14 公分, 週期 = 2 秒,頂浪下之無人船運動數據.....	2-21
圖 2.17 波高= 14 公分, 週期 = 2 秒,側浪下之無人船運動數據.....	2-22
圖 2.18 波高= 10.8 公分, 週期 = 3 秒,頂浪下之無人船運動數據 ..	2-23
圖 2.19 波高= 10.8 公分, 週期 = 3 秒,側浪下之無人船運動數據 ..	2-24
圖 2.20 波高= 8 公分, 週期 = 4 秒,頂浪下之無人船運動數據.....	2-25

圖 2.21 波高= 8 公分, 週期 = 4 秒, 側浪下之無人船運動數據.....	2-26
圖 2.22 起伏運動模擬與水槽測試的比較	2-27
圖 2.23 縱搖運動模擬與水槽測試的比較	2-27
圖 2.24 橫搖運動模擬與水槽測試的比較	2-28
圖 2.25 無人船外觀	2-29
圖 2.26 無人船於河道中性能測試情形	2-29
圖 3.1 地球中心慣性座標系	3-2
圖 3.2 地球固定座標系	3-3
圖 3.3 當地水平座標系	3-3
圖 3.4 附體座標系	3-4
圖 3.5 ECEF 座標系統與 NED 座標系統之轉換關係	3-7
圖 3.6 WGS84 座標系	3-9
圖 3.7 延伸型卡爾曼濾波器定位流程	3-13
圖 3.8 無人船遙控系統架構	3-15
圖 3.9 使用者網頁	3-17
圖 3.10 探測範圍為 45 度矩形, 分割成十等份之路徑點規劃	3-18
圖 4.1 太陽能電池等效電路	4-2
圖 4.2 (TDA-1400)在標準環境($1000\text{W}/\text{m}^2$ 25°C)下的 I-V 曲線	4-4
圖 4.3 (TDA-1400)在標準環境($1000\text{W}/\text{m}^2$ 25°C)下的 P-V 曲線	4-5
圖 4.4 工業電腦 eBOX530-820-FL 外觀	4-7
圖 4.5 AIS 運作所需功率之量測	4-7
圖 4.6 獨立型太陽能發電系統連接方式	4-9

圖 4.7 太陽方位定義	4-10
圖 4.8 傾斜面上所受的日照強度	4-14
圖 4.9 無人船在不同的季節可獲得之電量狀況	4-16
圖 4.10 單位長度所消耗之能量與速度之關係	4-18
圖 4.11 太陽能發電量為 1.309kW-hr 時，路徑間距及量測時間之關係 4-20	
圖 4.12 太陽能發電量為 0.848kW-hr 時，路徑間距及量測時間之關係.....	4-20

表 目 錄

表 2.1 無人船各項尺寸	2-5
表 2.2 推力估算與船速	2-8
表 3.1 WGS84 參數.....	3-10
表 3.2 延伸型卡爾曼濾波器定位演算法	3-14
表 4.1 太陽能板模組(KI-PSP-130)規格	4-4
表 4.2 季節相關係數	4-13
表 4.3 無人船電力消耗計算式各項參數	4-18

第一章 前言

本計畫之目的為建立太陽能驅動之智慧型無人船舶，研發近岸海洋資料蒐集、測量、資料傳送與輔助救難之自動控制船舶相關技術。具有自動導航定位功能、攜帶多種探測儀器、使用太陽能與充電電池驅動之自主式無人船舶系統，可以做為海洋研究資料蒐集、測量與海上救難之輔助工具。在近岸、淺水域之研究測量船隻，其作業之困難為無法做精確的路徑控制、測量信號受到風浪影響容易受到干擾，且工作小船之操縱需要人力，速度控制困難不利資料精度等，這些工作條件使得近岸海域研究與測量工作之成本昂貴且費時。本計畫之研究目標為設計、製作一具自主式無人工作小船，採用穩定之船體設計，利用太陽能與充電電池驅動，建立其在導航定位與路徑追隨自動控制系統。此工作船可攜帶多種量測儀器，自動施行港口之水深、水流剖面、地貌等蒐集與測量等工作，且可將資料藉由無線電波傳送至岸上之監控電腦。

自主式無人船舶(Autonomous Surface Craft; ASV, 或稱 Unmanned Surface Craft; USV)為 1990 年之後，基於衛星導航技術之大幅度進展而衍生出之構想與成品[1,2]，可以做為海上之自動化資料蒐集與無人觀測站。無人船研究的主要的挑戰為：如何延伸水平通訊距離，以與操

作母船或陸基做高頻聯繫；如何有效地施放與回收；如何提昇能源效率與從環境擷取能源；如何增進自主性能及提高可靠度等。近來新興的研究課題，則涵蓋連結無人船與自主式水下載具、無人飛行器的網路架構與載具之間的協同控制問題[3]。文獻[4]為一教學用無人船的設計架構，而文獻[5-9]則詳述 5 具最新的海洋科學用無人船的設計與導航控制系統之研發成果。文獻[10]展示使用無人船最為自主推進的海洋研究浮標的觀念，可以輔助傳統浮標需要長繫纜與維護不易的困擾。若結合多具無人船，長期定位於海洋特定位置，則可形成一自主式的海洋觀測網路，十分有利於獲取長期、即時、大範圍的同步海象資料，對於海洋、大氣的研究與預報等提供目前所無法獲得的珍貴數據，將為未來研究無人船系統設計之主流方向。

本計畫所建立之無人船具有網路遙控功能，計畫成果可直接延伸成為海洋量測之無人船舶團隊，本計畫所研究之自主式無人船舶系統具備下列功能：

- 1.具有在波浪與洋流中位置控制的能力；
- 2.可以量測各自由度之船舶運動；
- 3.具有目標點追蹤、自動化海域測量路徑規劃、導航追蹤的功能；
- 4.具有數據無線傳送、遙控運動控制與參數修改，以及量測儀器之遙控操作等介面；

- 5.具有長時間海上作業能力;
- 6.可彈性配掛不同的測量儀器，以支援不同的任務;
- 7.船體為模組式設計，易於拆裝搬運。

根據上述目標，本計畫擬研究下列必要課題：

1. 自主式無人船舶之船體設計;
2. 自主式無人船舶之電路系統設計;
3. 自主式無人船舶之操控系統設計;
4. 自主式無人船舶之定位導航系統設計;
5. 自主式無人船舶之路徑規劃與任務控制系統設計。

本研究以四年為期，分年工作項目與主要研究內容如下：

1. 98 年度：自主式無人船舶之船體與電路系統設計

內容：建立自主式無人船舶船型、船體結構與電源電路系統。船體設計之重點為低阻力、高耐海性能、優良的穩定性與操控性、大空間以容納量測儀器。電路系統設計重點為太陽能與充電系統之設計、電能管理系統、推進與儀器用電路設計。

2. 99 年度：自主式無人船舶之操控系統設計

內容：建立自主式無人船舶之操控系統、自主式無人船舶之動力系統開發。建立自航運動控制器與無線數據傳輸、遙控操作介面，建立電源系統監控程式，以及建立自主式無人離型船舶。

3. 100 年度：自主式無人船舶之定位導航系統設計

內容：建立船舶自動定位系統，整合衛星定位、方向計與都卜勒聲納等導航資訊，建立具有強健性之路由點及路徑追隨控制器。

4. 101 年度：自主式無人船舶之路徑規劃與任務控制系統設計

內容：整合電子海圖與無人船舶之操控介面、建立自動測量路徑規劃程式、整合路徑規劃程式與自動駕駛程式。

本計畫預期可獲得下列成果：

1. 掌握自主式無人船舶系統之研發能力，建立海洋量測自動化作業技術。
2. 建立自主式無人船舶之導航定位系統。
3. 建立自主式無人船舶路徑追隨自動控制系統。

本計畫效益及其應用：

1. 預期效益可以提升各港務局水深測量，海巡署搜救，各學術單位海岸調查，內政部國土測繪等無人遙控載具的運用，避免人力浪費。
2. 可以應用於提升國內自製的智慧型太陽能遙控船的技術能力。
3. 可以應用於提升水深測量、水流剖面、地形調查時之遙控載具。
4. 可以應用於無人船舶利用無線電波監控之技術。

本計畫第一年度（98 年）完成 AIS 攜帶控制資料之軟體撰寫、

硬體測試，為無人船之通訊、控制及資料傳輸的主要設施。第一年也已完成船型之初步選擇，及船體的製作[11]。本報告為第二年之期末報告。第二章說明無人船設計之進度，包含無人船船之外型、阻力預估，以及考慮量測誤差限制條件下的耐海性能設計等；第三章描述無人船遙控操作及導航訊號處理之構想；第四章則包含無人船太陽能系統所能擷取之能量估算，及其對無人船探測能力影響之評估。本計畫之 99 年度主要成果為：完成無人船之操控系統、自主式無人船舶之動力系統開發，建立自航運動控制器與無線數據傳輸、遙控操作介面，建立電源系統監控程式，以及建立自主式無人船舶之雛型。

第二章 自主式無人船舶設計

自主式無人船主要功能為探勘水下資訊以及資料傳輸。無人船具有自動導航系統、搭載多種探測儀器以及太陽能充放電等特性。2.1 節介紹自主式無人船舶之船型設計與系統架構。2.2 節估算自主式無人船之阻力係數並結合能量計算取得無人船前進之最佳速度。2.3 節預估無人船之耐海性能，並利用預估結果來限制無人船出海之海況條件。

2.1 船型設計與系統架構

本計畫選用 SWATH 船型作為實驗船，此船型有下列幾項特性：

- (1) 耐波性能佳：本計畫將會利用儀器探測水面與水下資訊，所以需要穩定的航行以利資料的擷取，選擇耐波性能佳的船體將可以避免在航行時的不穩定運動。
- (2) 從船體的構造來看，比起一般船體 SWATH 具有寬廣的平台面積和充裕的使用空間。這將有利於計畫中大型太陽能板的設計以及其他儀器設備(通訊、遙控、電腦等)在平台的佈置規劃。
- (3) 操縱航向穩定性好，尤其在低速時的回轉性能較佳。由於本計畫之所有任務皆採用低速航行或船舶原地定位的方式操作，以利聲學、光學等感測器之運作，這項特點將有助於船體導航定位的準確性和

方便性。

(4) 建造成本低，建造時間快。SWATH 幾乎全是平面和圓柱等單純的形狀組成，這將有利於設計、建造及降低成本。

綜合 SWATH 跟其他一般船型的比較，在性能、使用和建造等方面可以看出這種船型擁有優異的耐海性、寬廣的工作平台及良好的操縱穩定性能，因此 SWATH 目前主要被應用在噸位不大而又對耐海性能要求高的船，如海洋水文調查船、客運渡輪等，這些特性皆符合此計劃之需要。SWATH 缺點則在於船體浸水面積較大，相對的摩擦阻力也較大，所以與相當排水量的單體船相比，SWATH 在低速時的阻力會較大。

本計劃選用 FormSys 公司的 Maxsurf 軟體來進行船型的構圖以及尺寸係數的運算及性能[12]。為簡化製作過程，船身皆採用圓形或直線造型，圖 2.1 所示為此船的形狀與硬體配置。

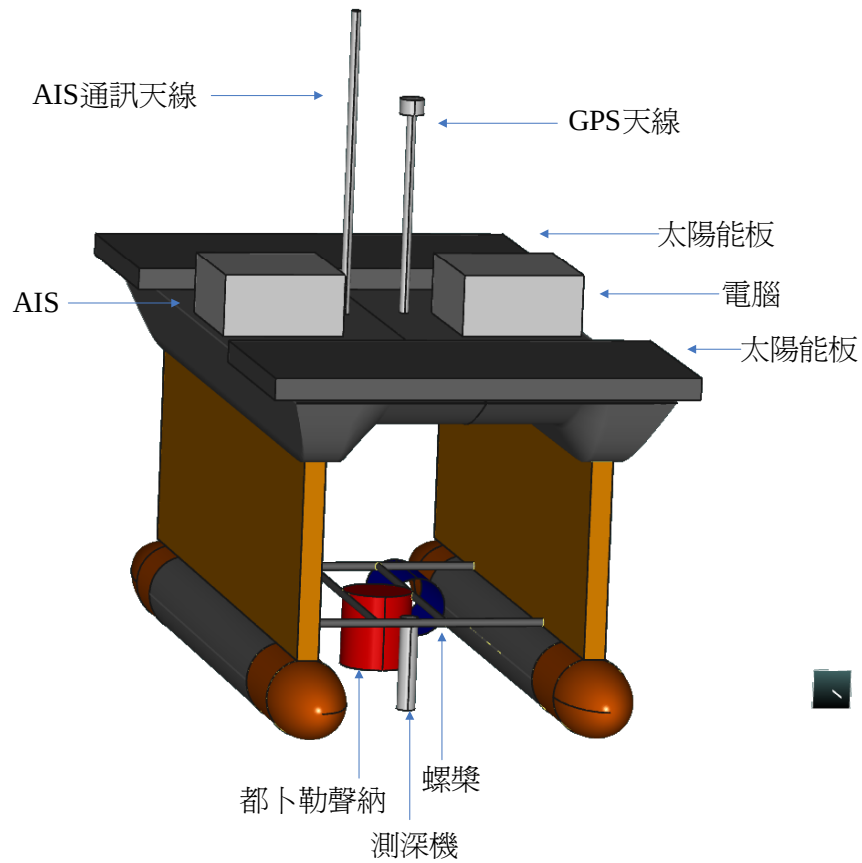


圖 2.1 無人船外形及硬體配置

無人船的座標系及主要尺度如下：

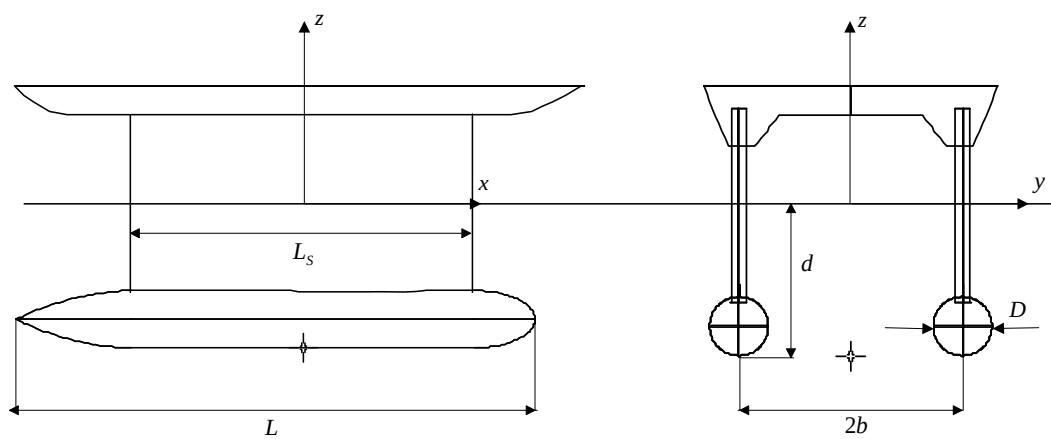


圖 2.2 無人船的座標系及主要尺度

表 2.1 為無人船性能預估所選擇的主要尺寸。圖 2.2 中之各參數

定義如下：

L ：圓筒長度

L_s ：支柱的水線長

d ：吃水深

D ：圓筒直徑長

$2b$ ：兩圓筒之間距

本船的主要規格為 $L=2.75\text{m}$ 、 $L_s=2.05\text{m}$ 、 $d=0.5\text{m}$ 、 $D=0.25\text{m}$ 、 $2b=0.95\text{m}$

$L/D = 11$ 、 $d/D = 2$ 、 $2b/L = 0.345$ 。

表 2.1、無人船各項尺寸

項目	數值	單位
排水 (Displacement)	496.4	kg
吃水 (Draft Amidships)	0.95	m
船體長 (Length of main hull)	2.75	m
水線長 (Waterline Length)	2.379	m
最大 BWL (Beam max extents on waterline)	1.073	m
支柱寬 (Strut Width)	0.185	m
支柱高 (Strut Height)	0.82	m
甲板長 (Deck Length)	1.82	m
甲板寬 (Deck Width)	1.5	m
高度 (Height)	2.27	m
浸水面積 (Wetted Area)	17.265	m ²
水線面面積 (Waterplane Area)	0.749	m ²
菱形係數 (Prismatic coefficient. (Cp))	0.777	
方形係數 (Block coefficient (Cb))	0.678	
水線面面積係數 (Waterplane area coefficient. (Cwp))	0.996	
橫穩心高 (GMt)	0.292	m
縱穩心高 (GMI)	0.694	m
重心(Gravity Center)	(-0.87, 0, 0.12)	m

2.2 船體阻力估算

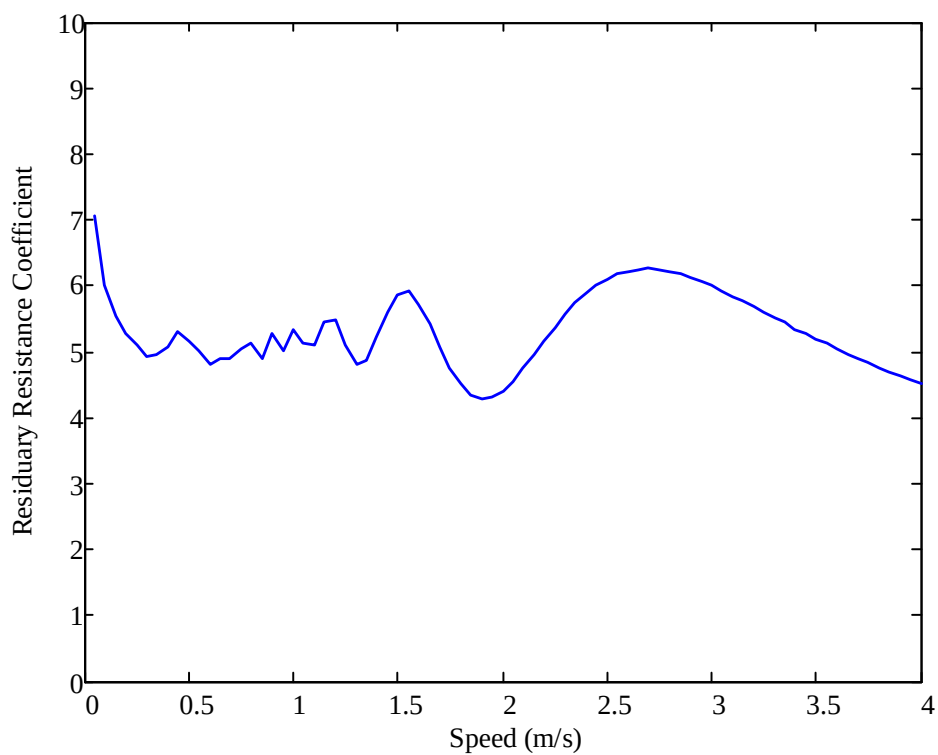


圖 2.3 設計船型剩餘阻力係數

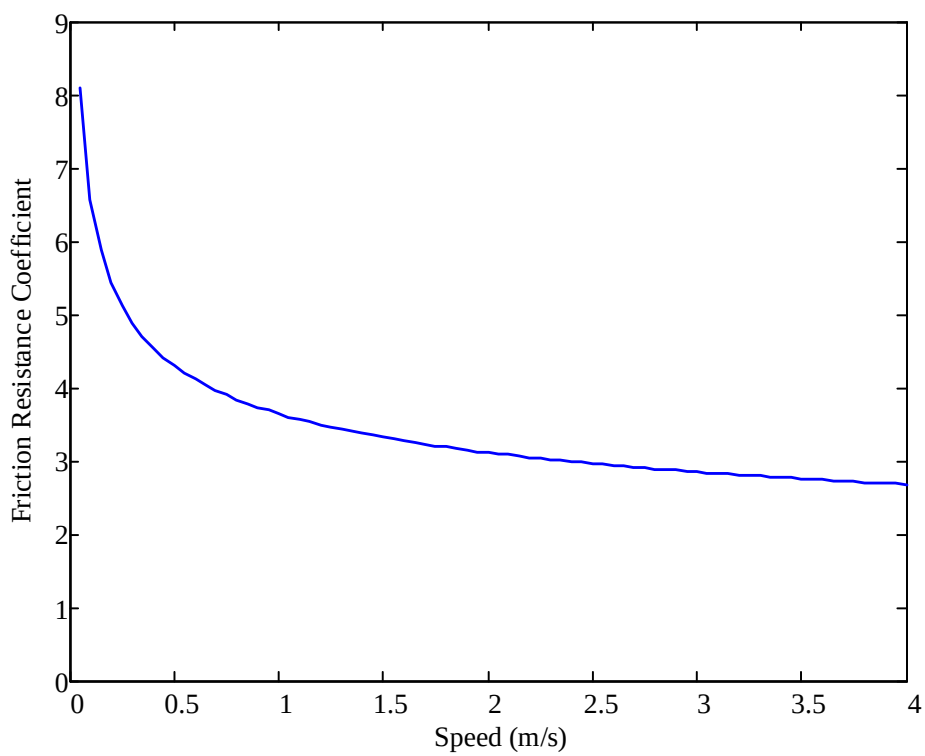


圖 2.4 設計船型摩擦阻力係數

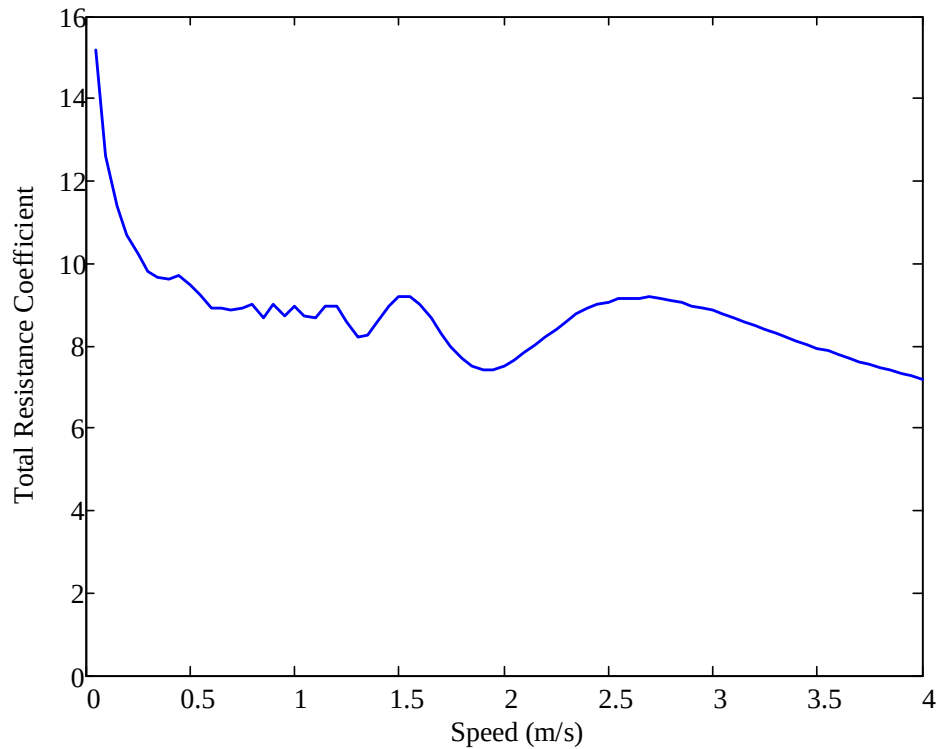


圖 2.5 設計船型總阻力係數

本節估算無人船在不同速度行進的情況下所對應的剩餘阻力係數、摩擦阻力係數與總阻力係數，Maxsurf 軟體計算結果分別如圖 2.3、圖 2.4 與圖 2.5 所示。

利用等速前進時總阻力等於推進力的關係，無人船在水槽中自航的數據可用來估算總阻力係數。表 2.2 所示為根據繫柱推力換算所得之推力，以及量測所得的無人船速度。推力換算所採用之推力減少係數 (thrust deduction factor) 為 0.3。

表 2.2 推力估算與船速

推力估算(N)	船速 (m/s)
3.92268	0.1045
9.8067	0.2194
19.6134	0.3374
29.4201	0.4484
68.6469	0.5652
107.8737	0.6947
137.2938	0.8219
196.134	0.977

圖 2.6 所示為將阻力換算為總阻力係數後，與 Maxsurf 軟體所計算之數值比較，在較低速度(0.5-0.75 m/s)範圍內，兩者雖有數值上的差異，但仍可供為選擇船速的參考。

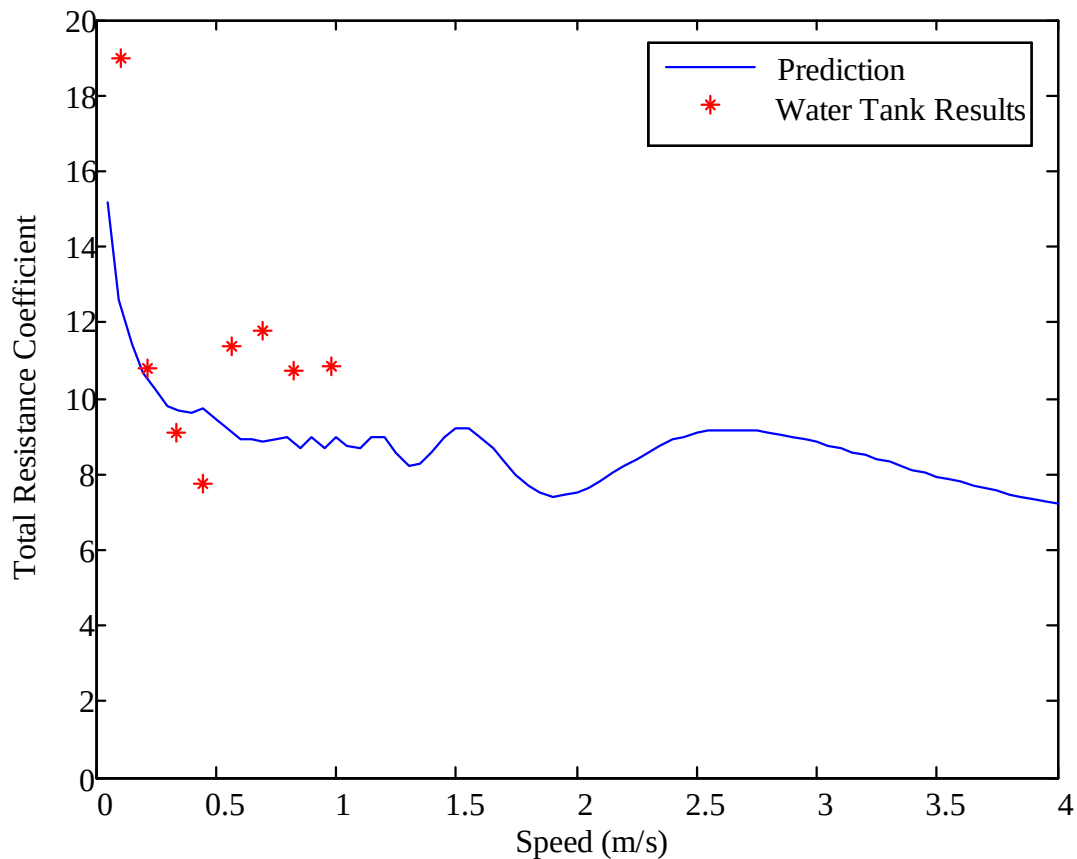


圖 2.6 模擬與自航試驗總阻力係數比較

由圖 2.6，可取得一較小阻力情況下之速度作為無人船的航行速度。假設作業區域之最大海流流速為 0.4 m/s，故在選取行進速度時必須大於 0.4m/s 以抗衡海流流速，而在低速度之 0.50 - 0.75 m/s 時阻力係數已達一較小的值，故選用此速度範圍作為無人船之航行速度。

2.3 耐海性能預估

在波浪中航行時，SWATH 比一般單體船在防止平台上浪有良好的優勢，這個特性可以避免平台上的儀器遭受到海水的波及導致損壞。

本節使用 Seakeeper 軟體[13]進行無人船的起伏、橫搖及縱搖的運

動性能估算。其中波浪的資訊參考港灣技術研究中心對中部海域的海象統計數據，同時假設船體在 0.75 m/s 的速度下行駛。

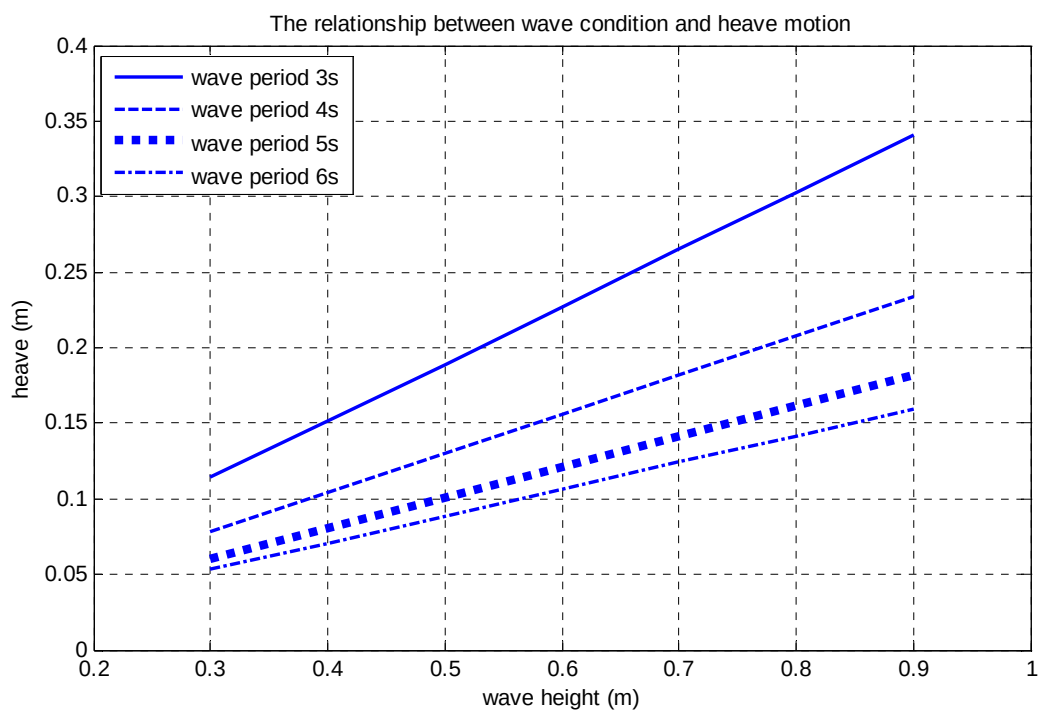


圖 2.7 不同波浪情況下對起伏運動的影響

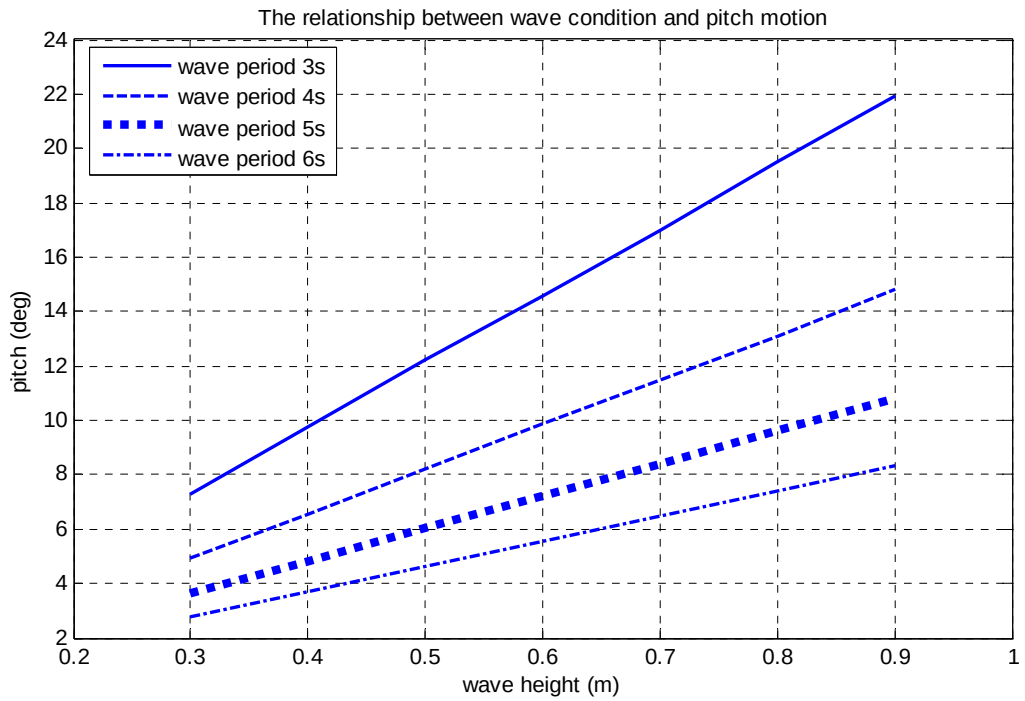


圖 2.8 不同波浪情況下對縱搖運動的影響

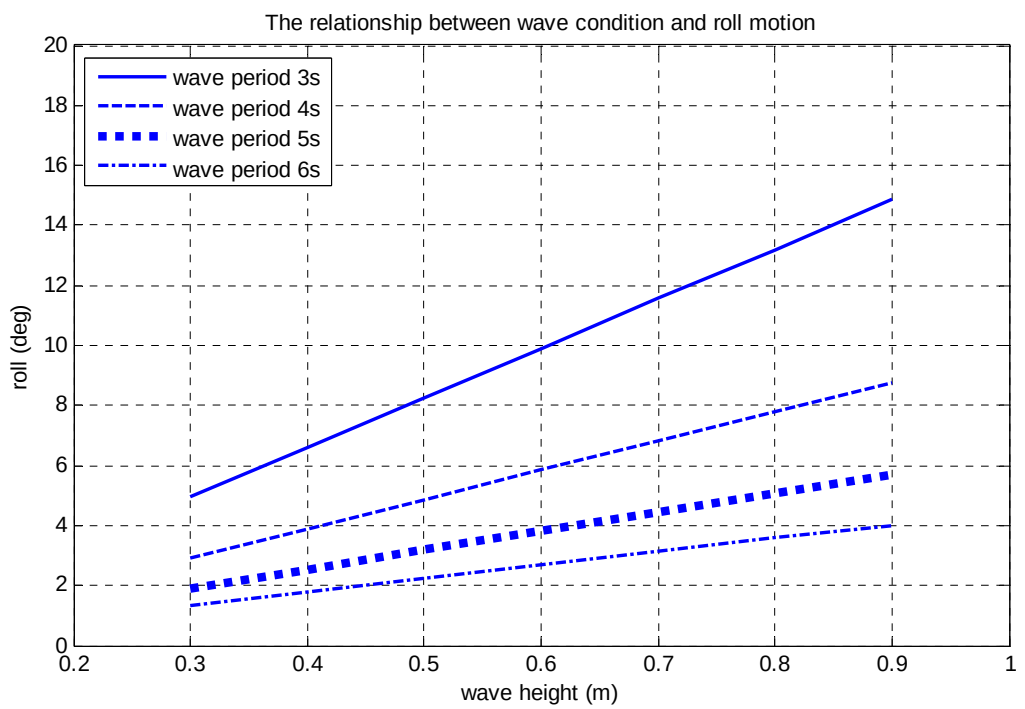


圖 2.9 不同波浪情況下對橫搖運動的影響

從圖 2.7 到圖 2.9 可以得到在不同波浪情況下船體起伏、縱搖、橫搖運動的最大結果，由結果可知，在同一波高的情況下週期越大則運動幅度越小，而在同一週期的情況下波高越高則運動幅度越大。

在利用測深機探測水深時，船體的起伏、縱搖與橫搖運動皆會影響測深結果，因此必須限制無人船作業的海況條件。本計畫將利用美國兵工署水深量測的限制規範為參考依據[14]。水深量測的準確率限制在 95%，若船體的運動導致量測結果小於 95% 的準確率，則此海況條件將不適宜無人船出海任務。例如，水深 10 公尺處之容許誤差為 0.5 公尺。船體運動對測深結果的影響如圖 2.10 所示， D_{survey} 為船體在起伏、縱搖與橫搖運動下所探測到的水深結果，(2.1) 式為 D_{survey} 的計算公式。

$$D_{survey} = \sqrt{(D+h)^2 + [(D+h) \times \tan(p)]^2 + [(D+h) \times \tan(r)]^2} \quad (2.1)$$

其中 D 為實際水深、 h 為船體起伏運動、 p 為船體縱搖運動、 r 為船體橫搖運動。

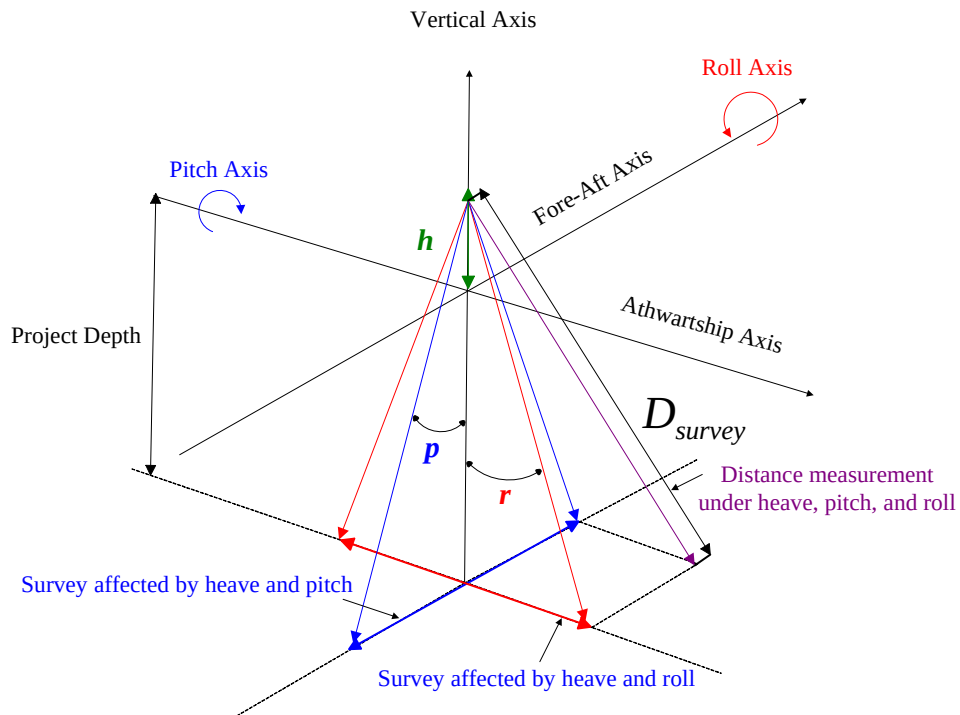


圖 2.10 船體起伏、縱搖與橫搖導致測深結果的誤差

圖 2.11 所示為水深 15 公尺的環境下，船體運動導致測深誤差與水深比與波浪週期、波高之關係的預測結果。此誤差水深比曲面在數值上可用以判斷該海況所產生的誤差是否在容許誤差的範圍內，若在小於 0.05 之容許範圍內，則代表該海況適合出海任務，反之若超出容許範圍則代表該海況不適合出海任務。

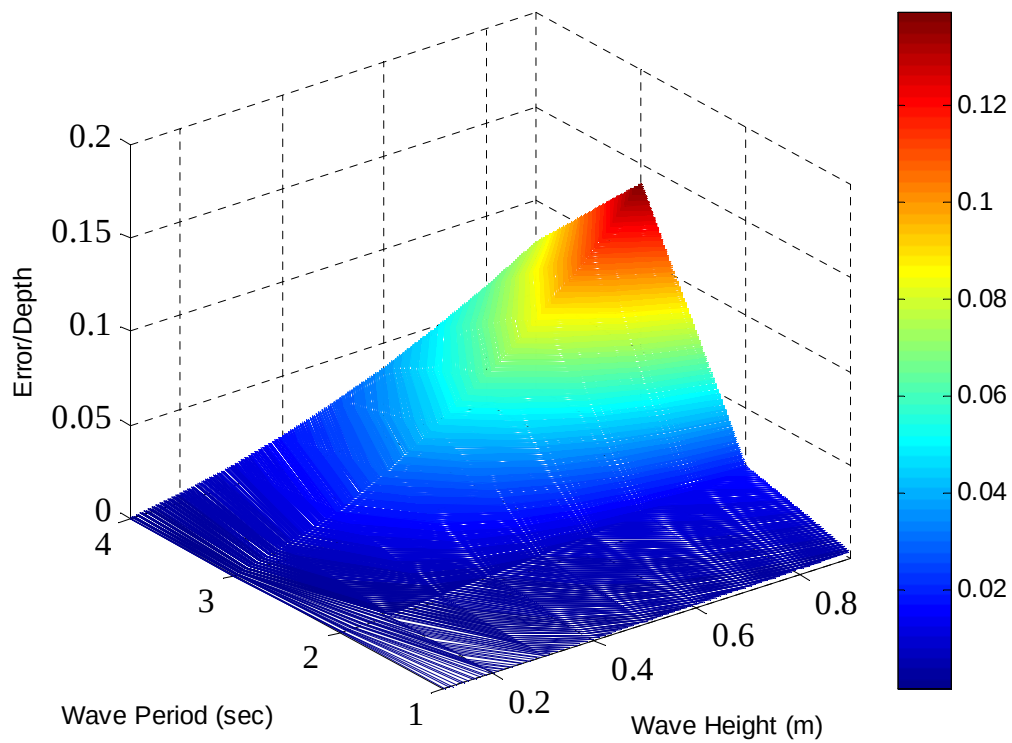


圖 2.11 水深 15 公尺船體運動導致測深誤差與水深比
與波浪週期、波高之關係

由圖 2.11 之模擬結果，可知本船在週期約 3 秒與波浪有共振現象。

以下分別以本船之設計資料推求其在起伏、橫搖、縱搖之自然頻率，

以做為驗證。船舶之起伏自然頻率可用下式估算：

$$T_{Heave} = 2\pi \sqrt{\frac{V(1 + A'_{33})}{gA_{WP}}} \quad (2.2)$$

$$T_{Roll} = 2\pi \sqrt{\frac{BWL^2(k_r^2 + A_{44}')}{gGM_T}} \quad (2.3)$$

$$T_{Pitch} = 2\pi \sqrt{\frac{L^2(k_p + A_{55}')}{gGM_l}} \quad (2.4)$$

上式中

V = 排水；

L = 船長；

g = 重力加速度；

k_r = 橫搖半徑與水線 beam 比；

k_p = 縱搖半徑與船長比；

A_{WP} = 水線面面積；

A_{33}' = 起伏流體附加質量與船舶質量比；

A_{44}' = 橫搖流體附加慣性矩與船舶質量與 BWL^2 乘積之比；

A_{55}' = 縱搖流體附加質量與船舶質量與 L^2 乘積之比；

使用(2.2)、(2.3)、(2.4)式所計算之起伏、橫搖、縱搖之自然頻率如下：

$$T_{Heave} = 2\pi \sqrt{\frac{0.49(1+0.7)}{9.8*0.749}} \approx 2.12 \text{ sec. ;}$$

$$T_{Roll} = 2\pi \sqrt{\frac{1.073^2(0.46^2 + 0.2)}{9.8*0.292}} \approx 2.38 \text{ sec ;}$$

以及

$$T_{Pitch} = 2\pi \sqrt{\frac{2.75^2(0.28^2 + 0.06)}{9.8 * 0.694}} \approx 2.46 \text{ sec.}$$

自然週期之估算與模擬之結果相符。由計算數值可知，橫搖與起伏週期兩倍具有差異，可避免橫搖與起伏之耦合，而橫搖與縱搖週期相異，也可避免橫搖與縱搖之耦合。由於本船之工作速度為低速，在頂浪下船速所造成之縱搖響應與波長關係與靜止時相似。

2.4 運動控制

無人船之方向閉回路控制之時間響應如圖 2.12, 2.13 所示。此二圖分別為方向角改變 90° 與 180° 之方向角變化。由數據可知，0° 至 90° 的上升時間約為 40 秒，而 0° 至 180° 約為 60 秒。

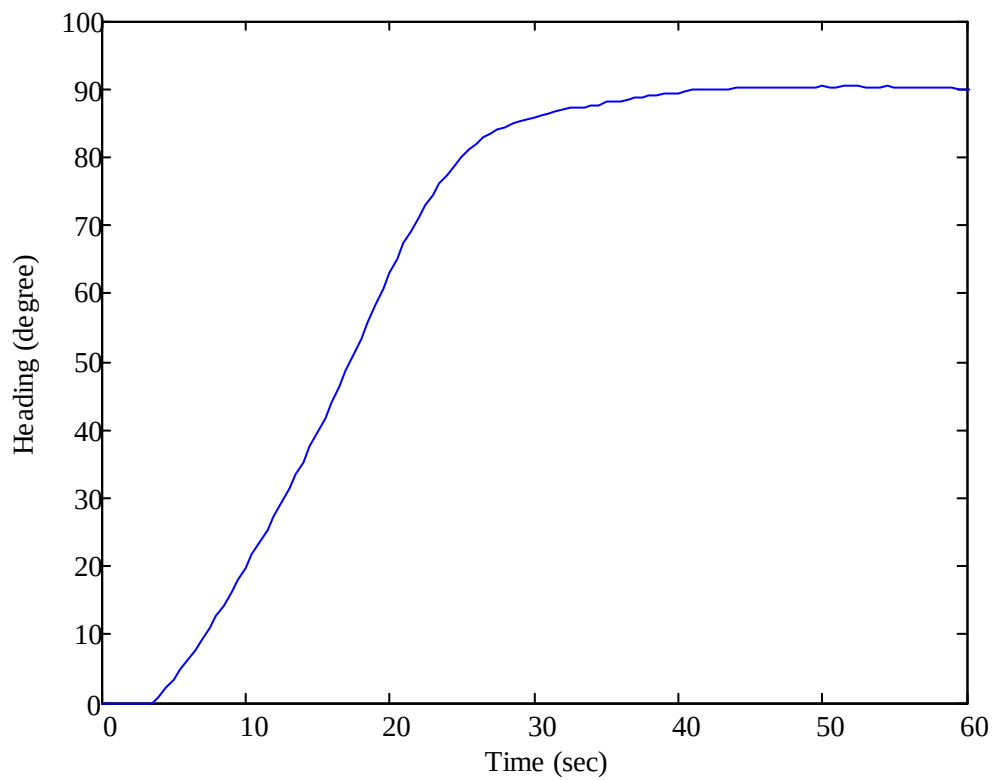


圖 2.12 無人船之 90°方向角改變控制數據

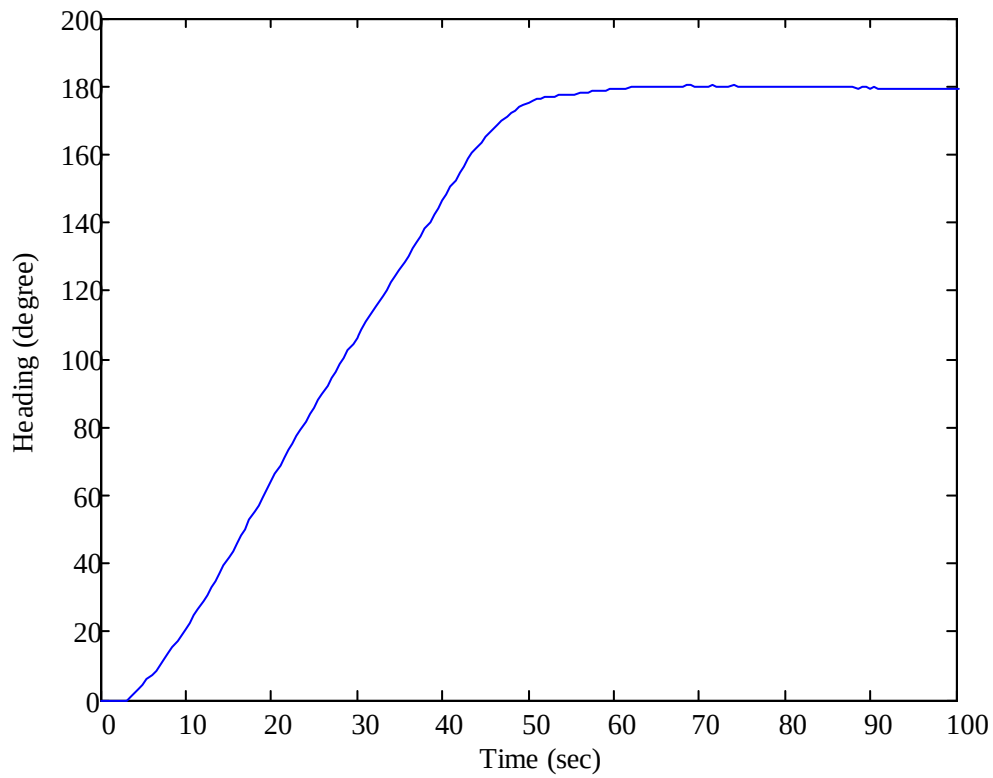


圖 2.13 無人船之 180° 方向角改變控制數據

圖 2.14 至圖 2.21 所示為造波機所激發之無人船運動數據。造波機提供四組規則波輸入，分別為波高 14 公分，週期 1 與 2 秒；波高 10.8 公分，週期 3 秒；以及波高 8 公分，週期 4 秒之波形，無人船採用迎浪與側浪等姿勢下所量測之縱搖、橫搖及起伏數據。

數據顯示，橫搖角受側浪影響大於縱搖角受頂浪之影響。為了避免過大的橫搖運動，無人船之量測作業路徑應規劃為順浪或頂浪。本實驗受到造波機規格限制，無法蒐集更為大型的波浪數據，但這些數據足以預估無人船在河道及近岸河口水域運動狀況，可知無人船適用於此類水域之作業。圖 2.22 至圖 2.24 顯造波機實驗與耐海性能模擬結果的比較。由於造波機性能之限制，波浪實驗數據僅能針對部分之模擬數據做比較。數據顯示在水槽中測試的結果與模擬結果的趨勢相近

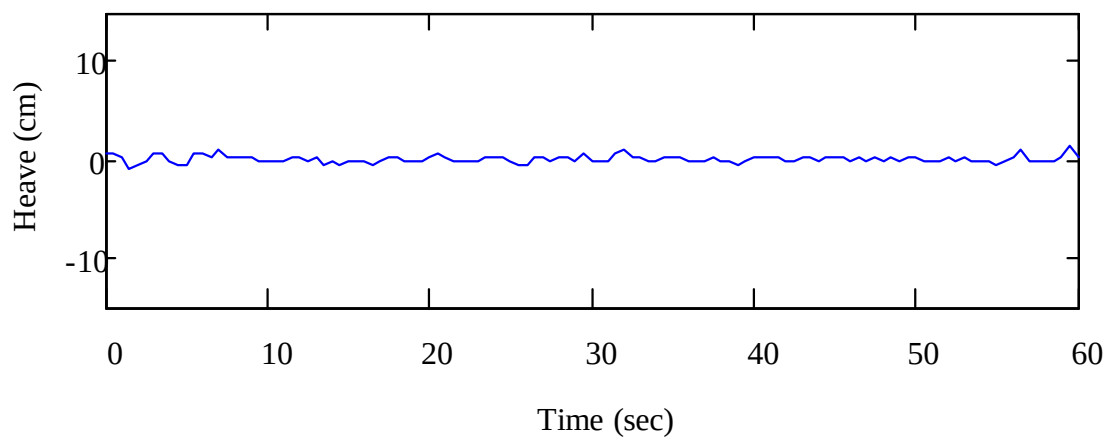
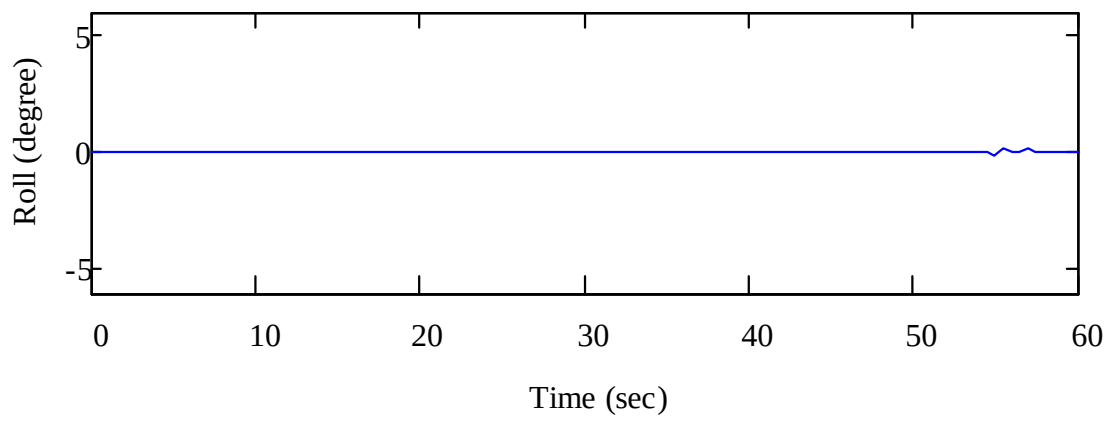
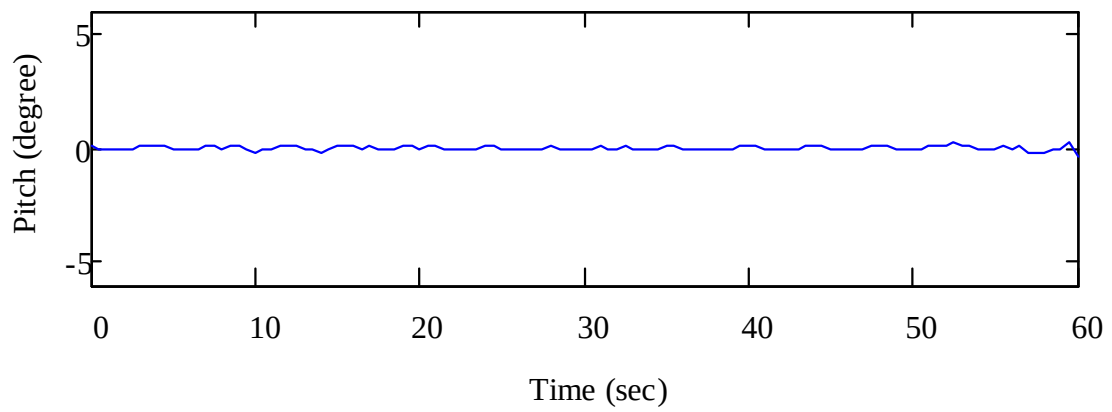


圖 2.14 波高= 14 公分，週期 = 1 秒，頂浪下之無人船運動數據

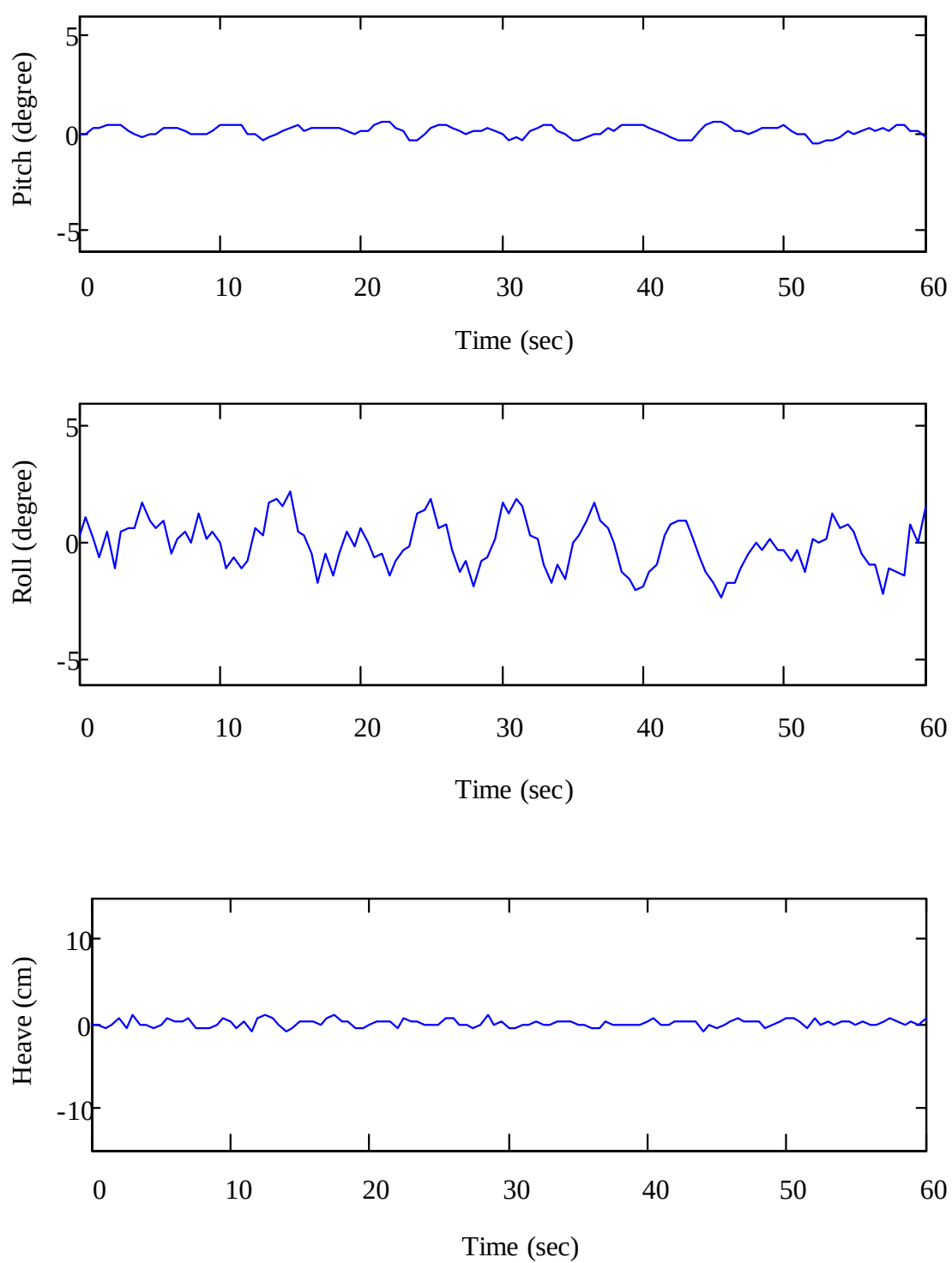


圖 2.15 波高= 14 公分，週期 = 1 秒，側浪下之無人船運動數據

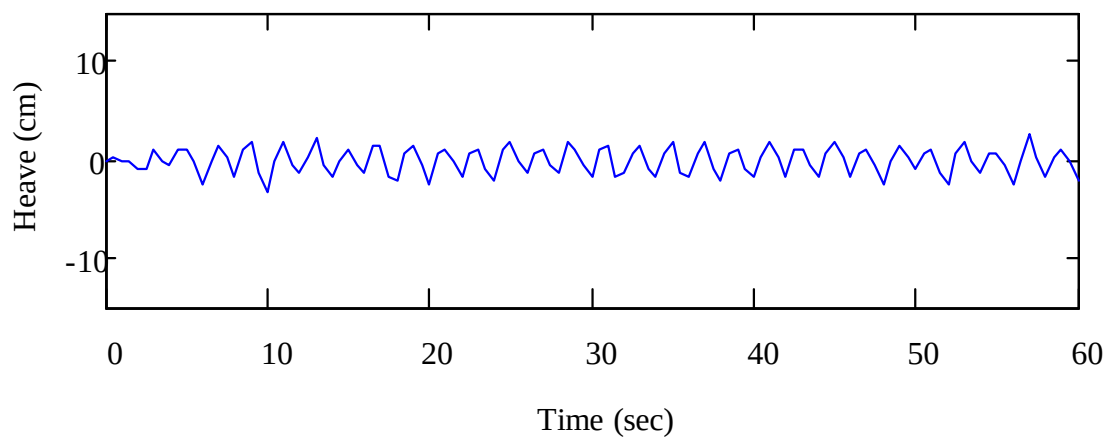
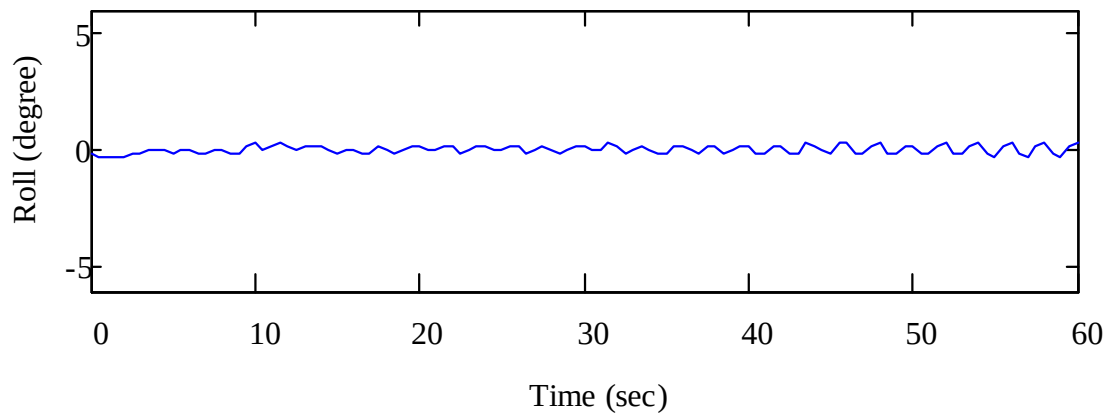
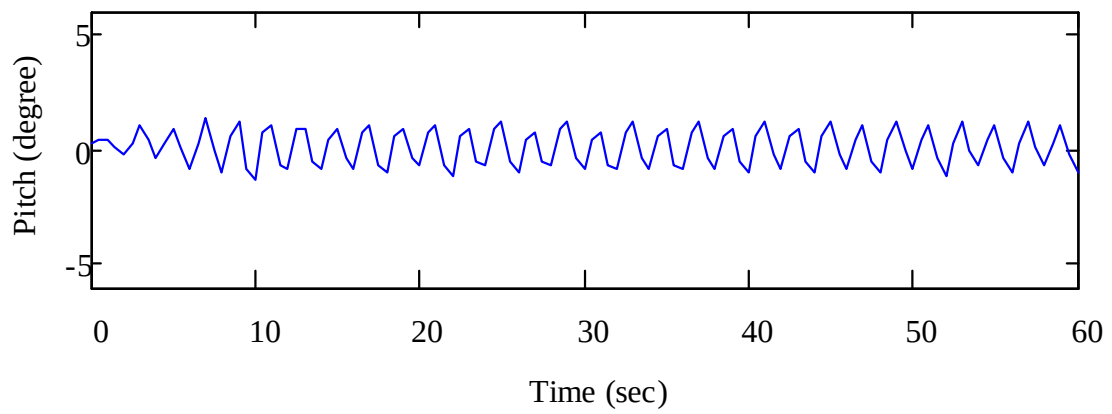


圖 2.16 波高= 14 公分，週期 = 2 秒，頂浪下之無人船運動數據

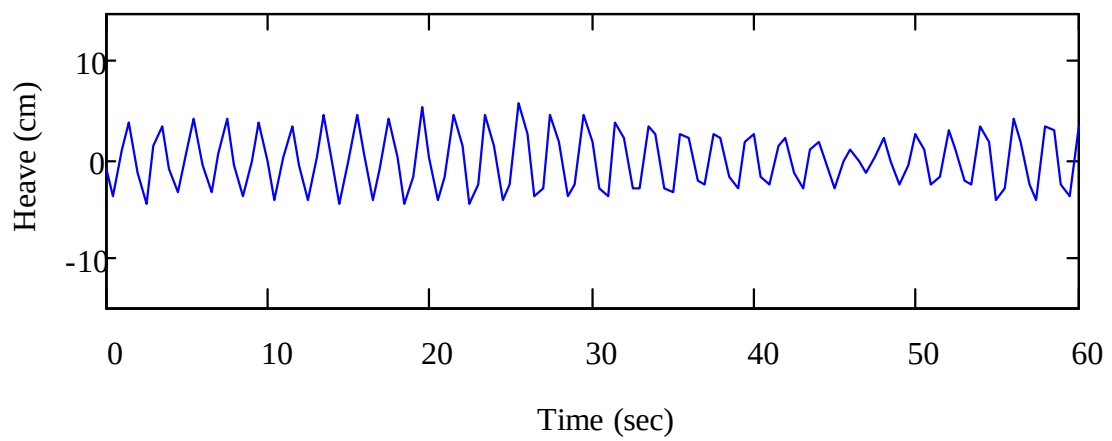
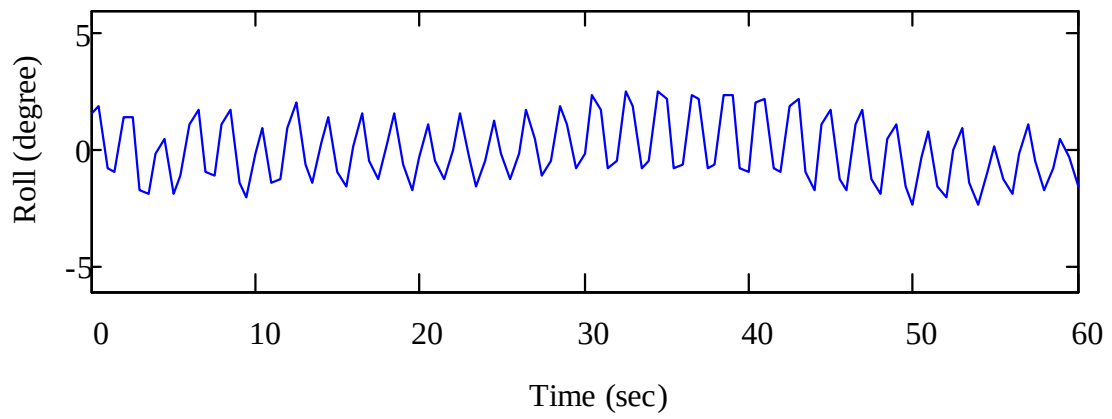
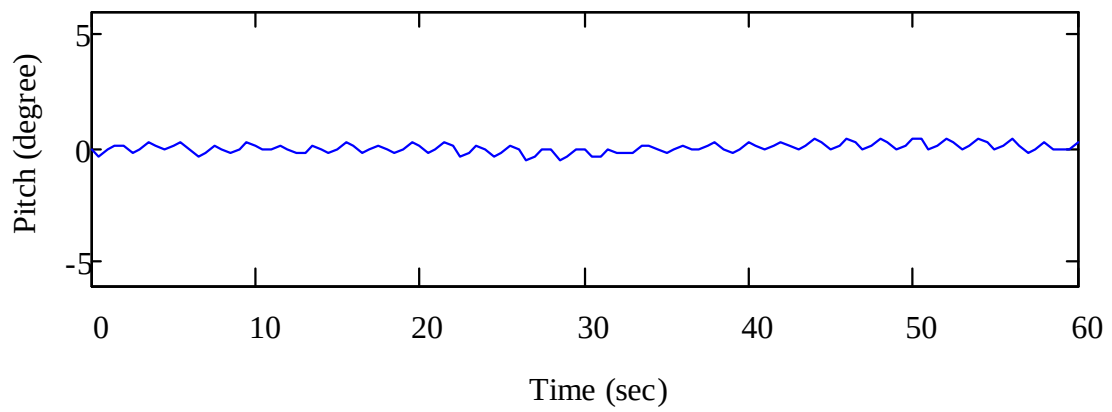


圖 2.17 波高= 14 公分，週期 = 2 秒，側浪下之無人船運動數據

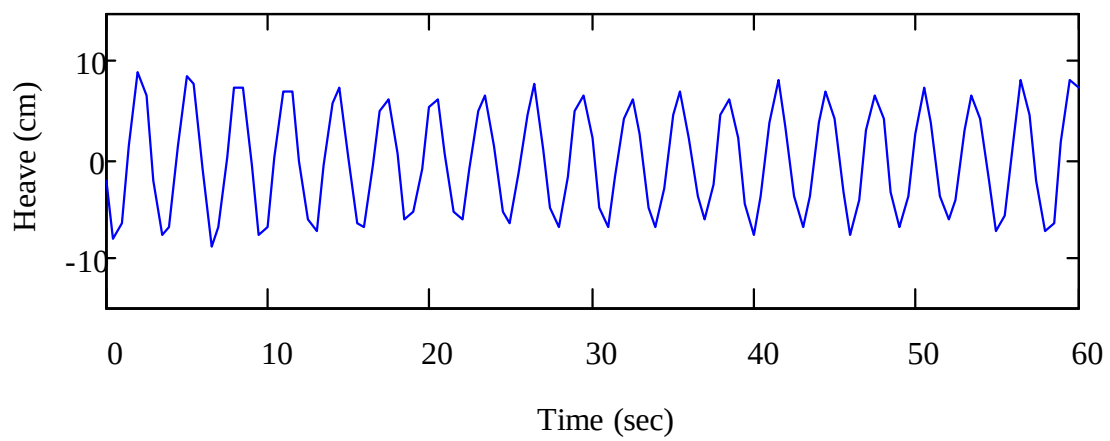
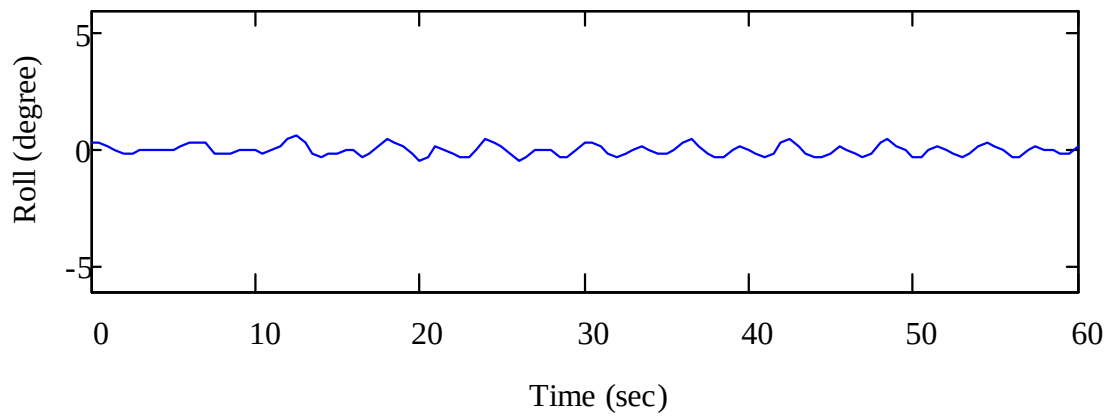
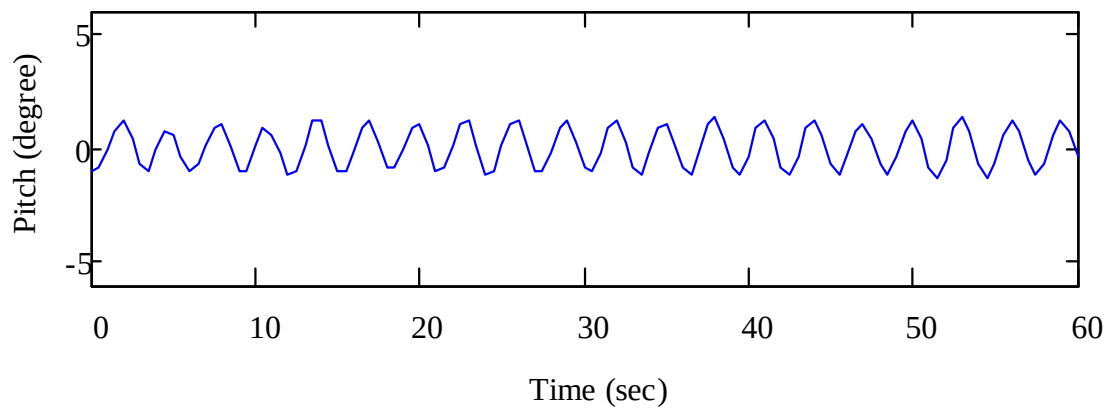


圖 2.18 波高= 10.8 公分，週期 = 3 秒，頂浪下之無人船運動數據

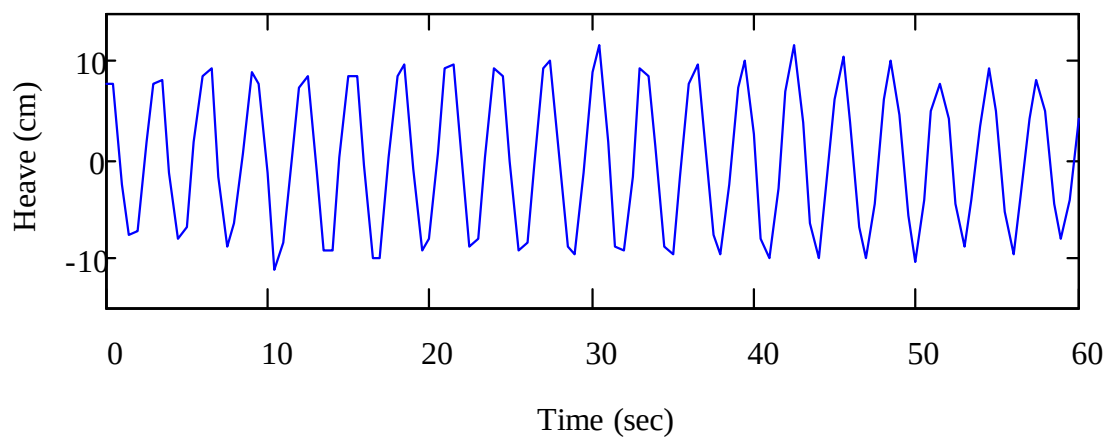
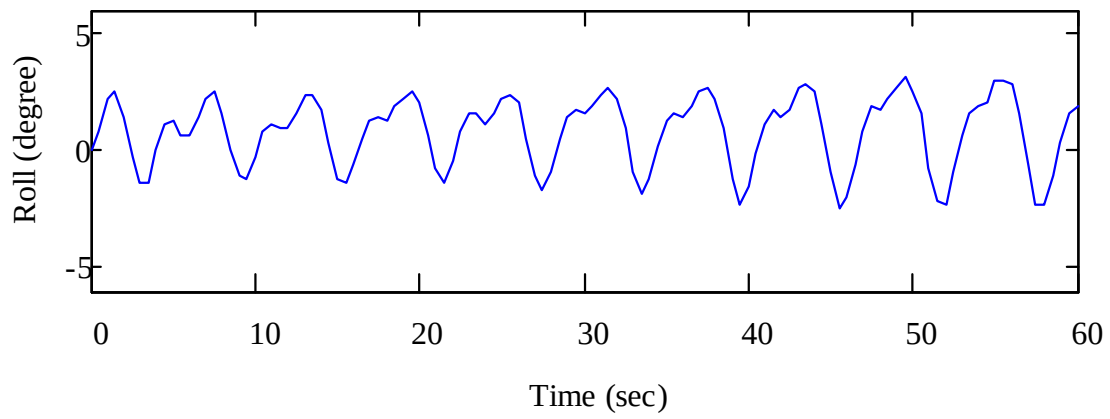
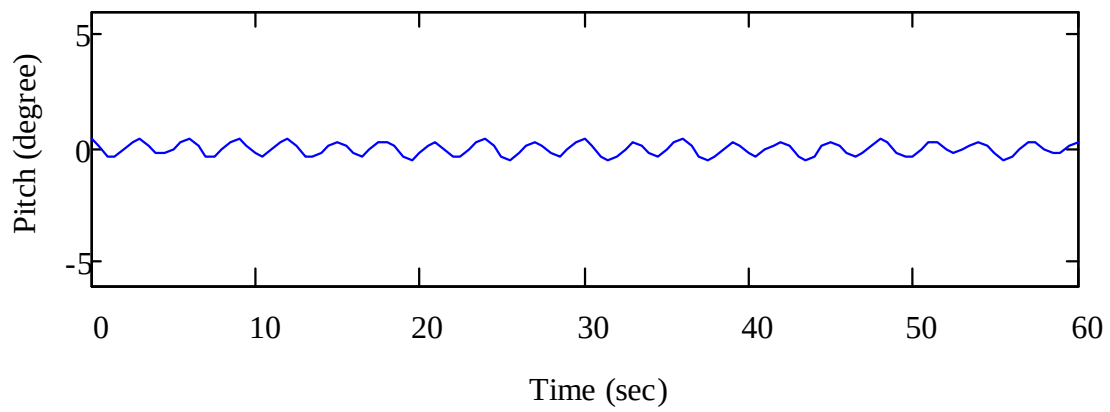


圖 2.19 波高= 10.8 公分，週期 = 3 秒，側浪下之無人船運動數據

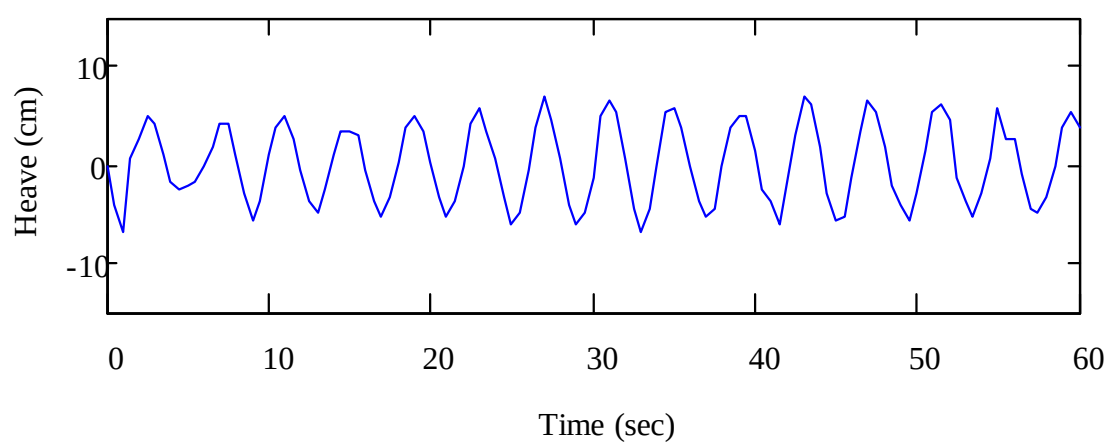
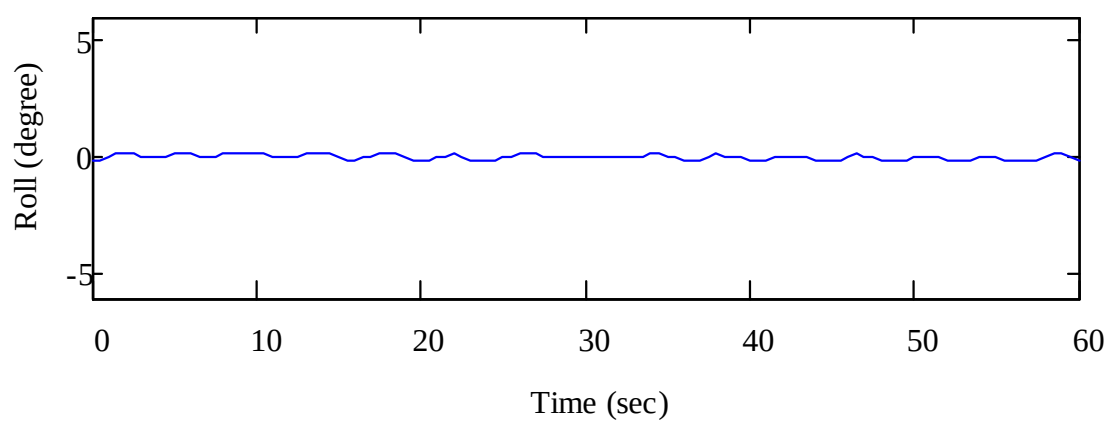
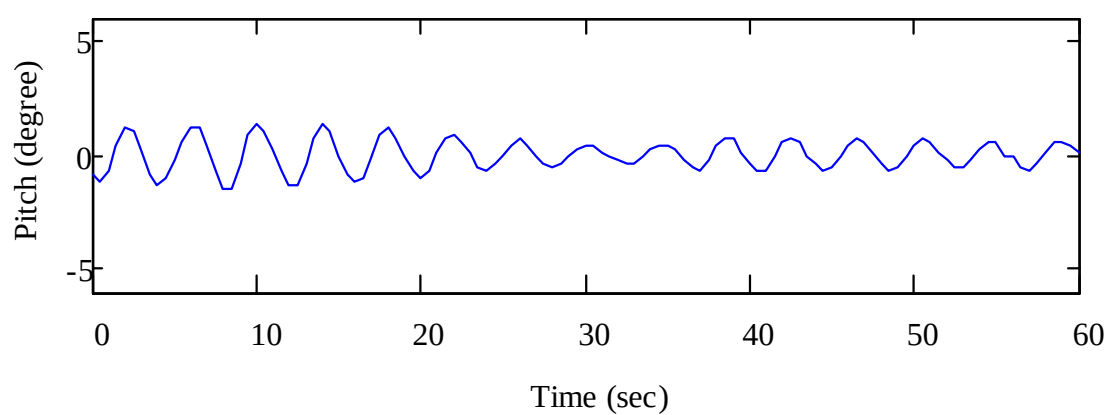


圖 2.20 波高=8 公分,週期 =4 秒, 頂浪下之無人船運動數據

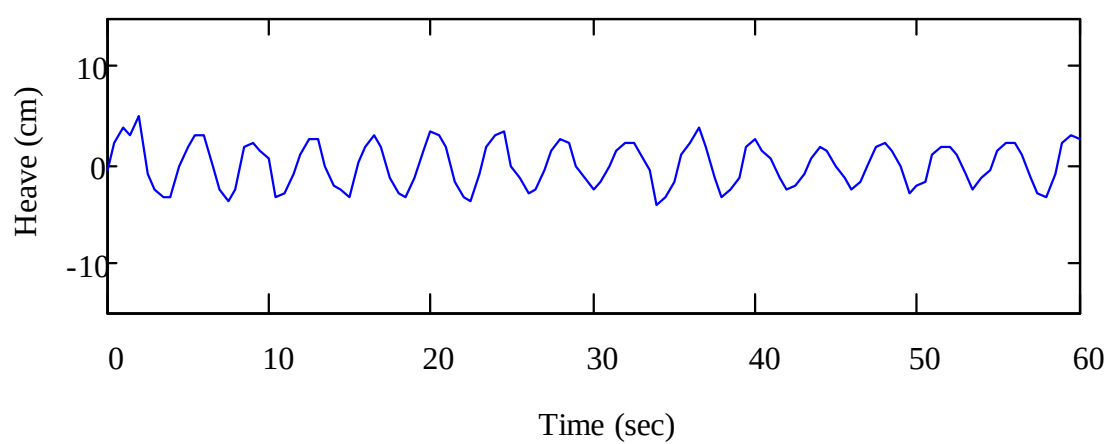
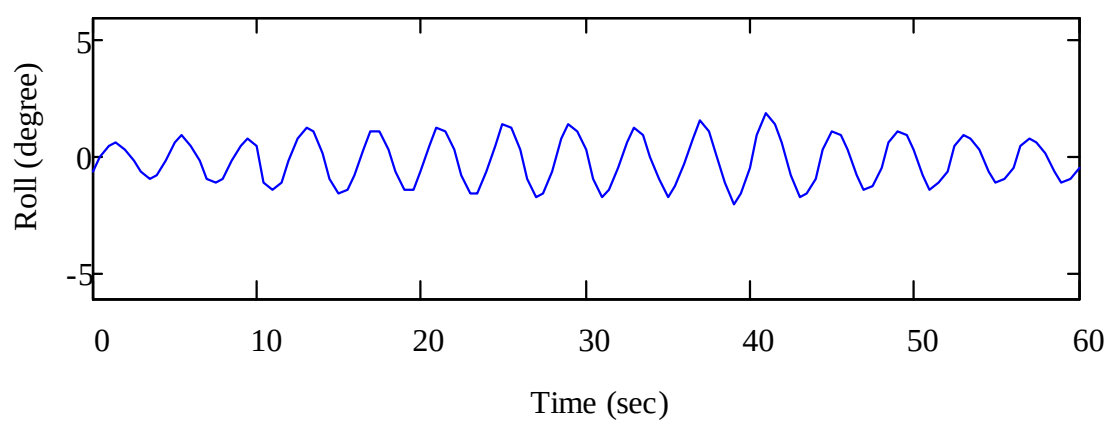
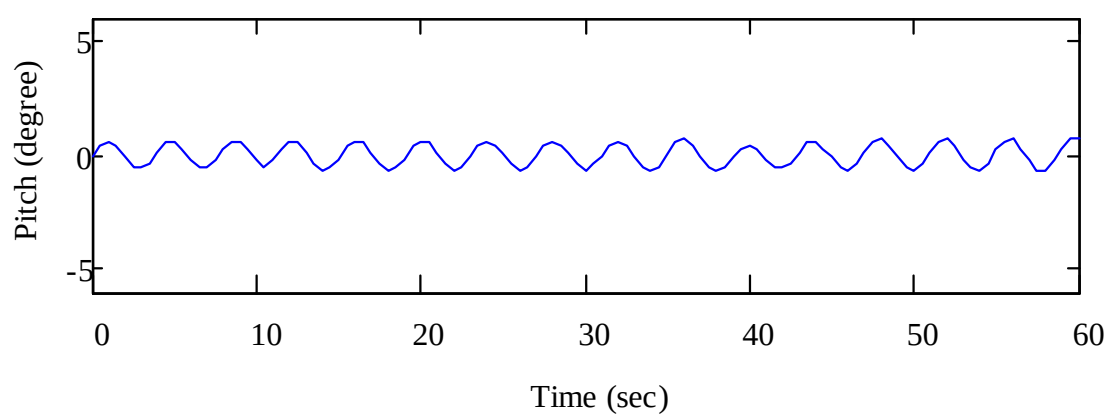


圖 2.21 波高=8 公分，週期 =4 秒，側浪下之無人船運動數據

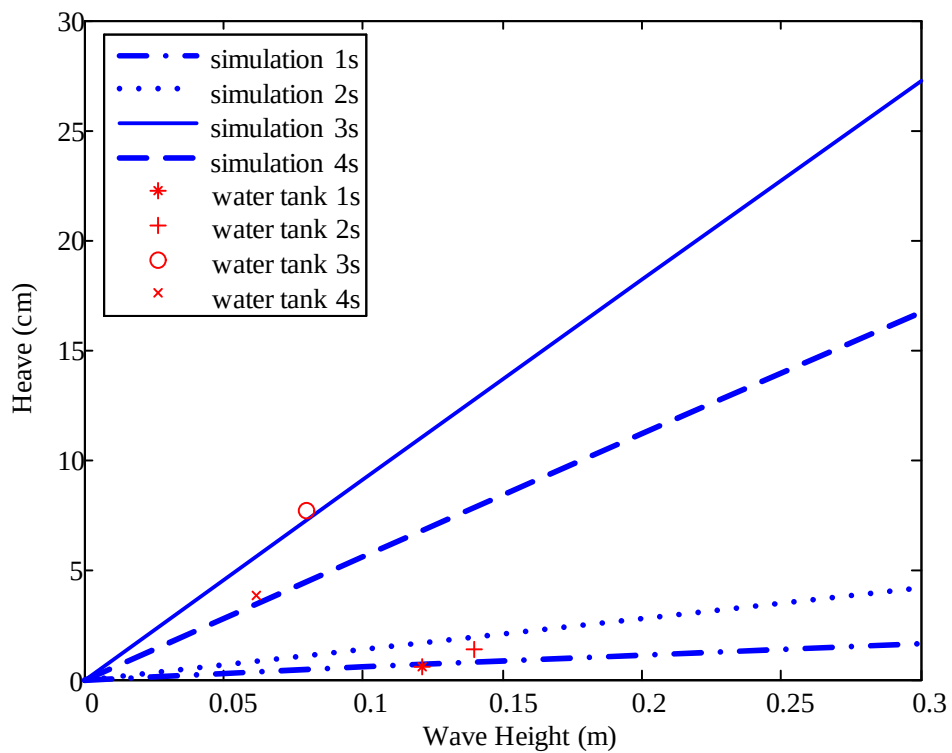


圖 2.22 起伏運動模擬與水槽測試的比較

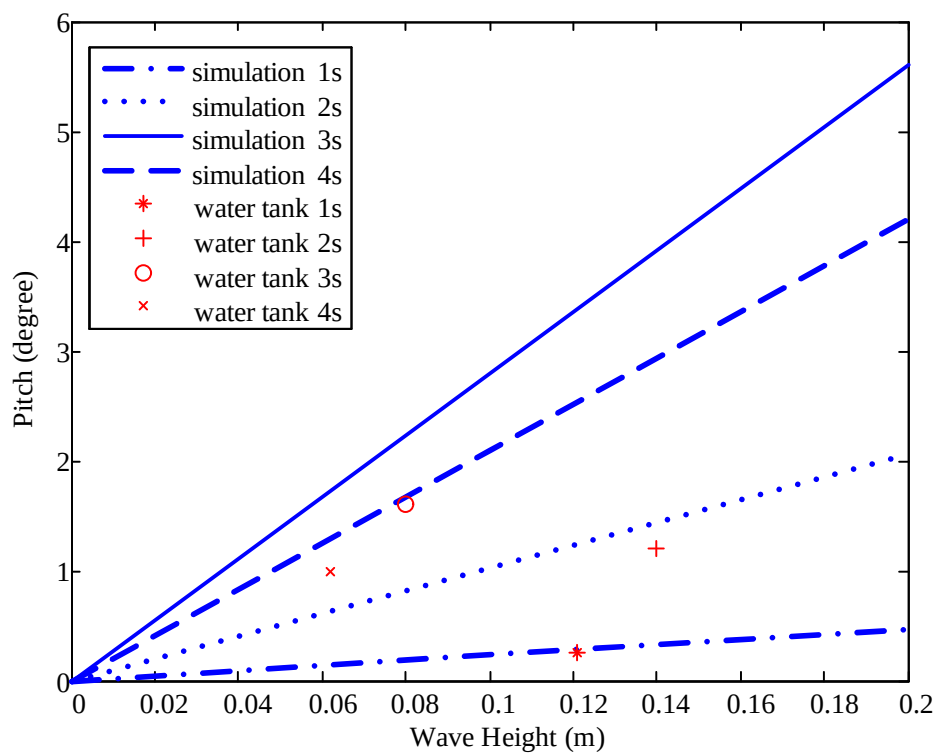


圖 2.23 縱搖運動模擬與水槽測試的比較

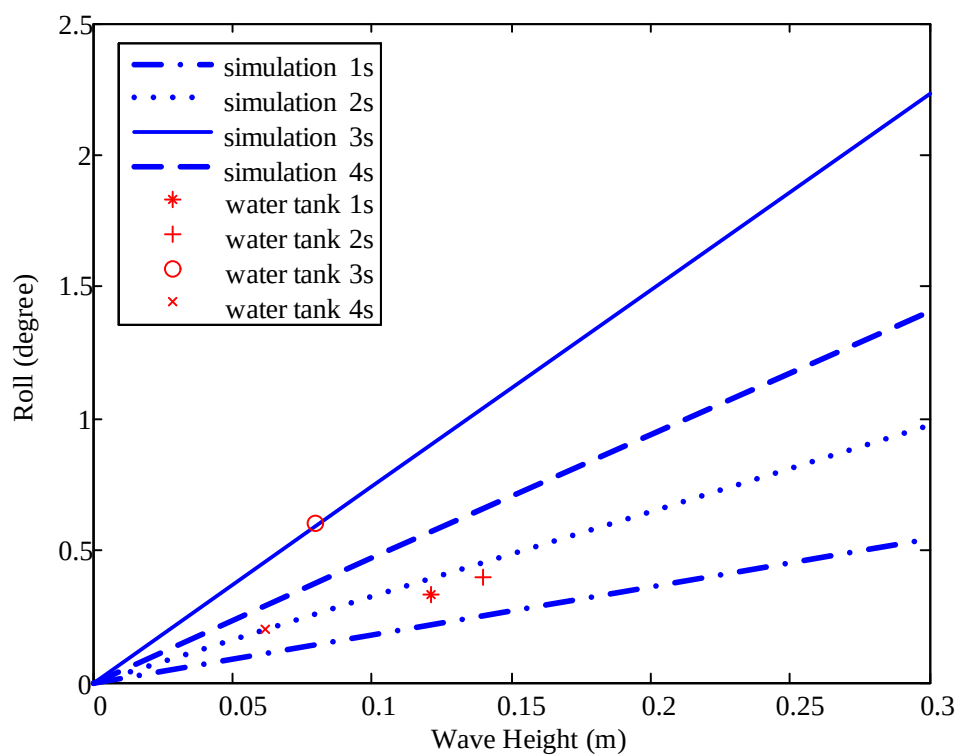


圖 2.24 橫搖運動模擬與水槽測試的比較

圖 2.25、2.26 為無人船測試時的照片，目前已完成船體之製作，電力系統與控制設施、初步的電力與控制系統功能測試，正在蒐集無人船控制系統在海上實驗的測試數據。



圖 2.25 無人船外觀



圖 2.26 無人船於河道中性能測試情形

第三章 無人船遙控操作系統

本章介紹自主式無人船的遙控操作系統。無人船利用船舶自動辨識系統（AIS）的通訊設備即時傳送無人船的狀態訊息，如經緯度位置、行進速度、艏向等，操作者藉由 Google maps 的介面，可以於網頁上即時了解無人船的狀態並下達控制命令。本章介紹無人船的狀態訊息表示方法，包含座標系統，狀態座標轉換，導航信號處理，以及遙控介面的設計。

3.1 參考座標

不同的感測器所量測的結果是基於各感測器所參考的座標系統，欲整合不同的感測器所量測到的資訊，必須處理座標系轉換。本節介紹在無人船定位時所需定義之座標系統。關於座標系更詳細的資訊與座標系統之間的轉換方法可參考[15,16]。

3.1.1 地球慣性座標系統 (Earth-centered inertial frame)

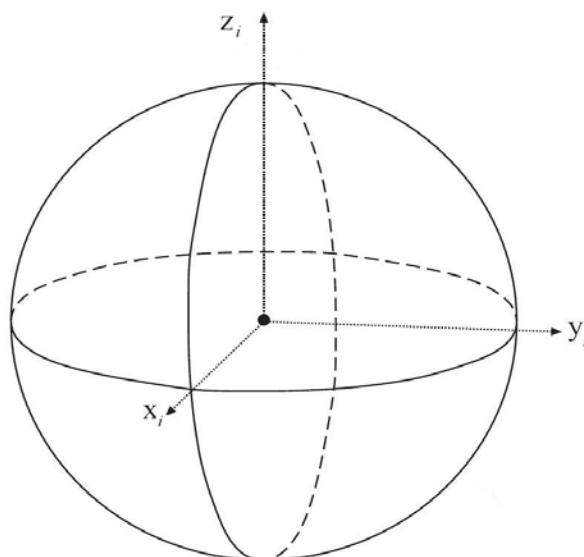


圖 3.1 地球中心慣性座標系

此座標系統亦簡稱為 ECI 座標系統。地球中心慣性座標系的原點 $X_i Y_i Z_i$ 位於地球的中心點如圖 3.1 所示。 X_i 軸與 Z_i 軸分別指向春分點與地球自轉軸的方向。 Y_i 軸滿足右手定則的方向。

3.1.2 地球固定座標系統 (Earth-centered Earth-fixed frame)

此座標系統亦簡稱為 ECEF 座標系統。座標系的原點 $X_e Y_e Z_e$ 位於地球中心，但座標系統會隨著地球自轉而轉動。 X_e 軸的正向為原點指向本初子午線(經度 0 度)和赤道(緯度 0 度)的交點。 Z_e 軸的正向為原點指向北極。 Y_e 軸滿足右手定則的方向，經過赤道與經度 90 度的交點。地球自轉的角速度為 $\omega_e = 7.292155 \times 10^{-5} \frac{rad}{sec}$ ，座標系統如圖 3.2 所示。

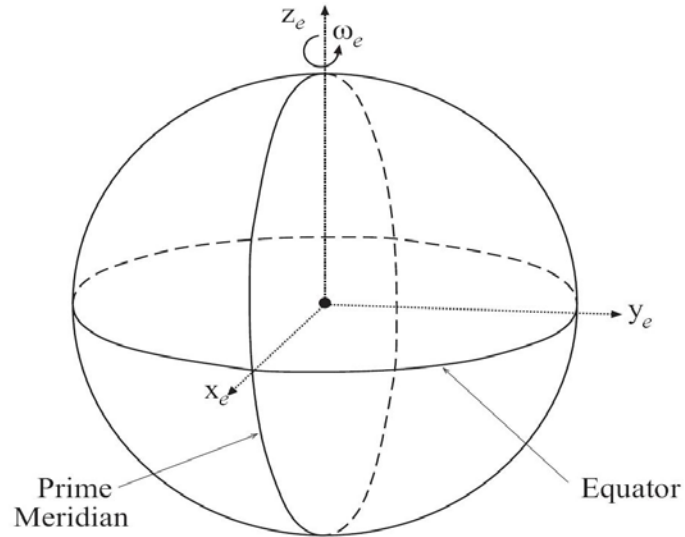


圖 3.2 地球固定座標系

3.1.3 當地水平座標系統 (North-East-Down frame)

此座標系統為日常生活中所使用的座標系統，即北、東、下直角座標系統，亦可簡稱為 NED 座標系統。原點為地表上的一點， n 軸指向北方， e 軸指向東方，而 d 軸指向下方並滿足右手定則，如圖 3.3 所示。

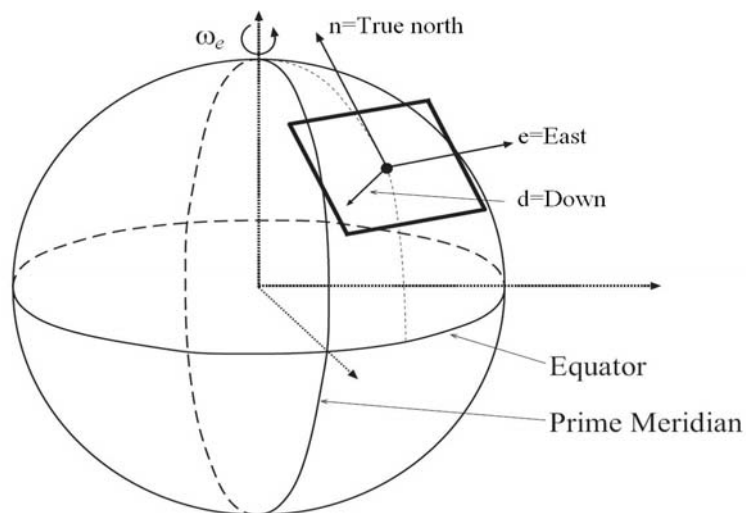


圖 3.3 當地水平座標系統

3.1.4 附體座標系統 (Body frame)

附體座標系統為一固定於無人船的座標系統，座標系統有 u 、 v 、 w 三軸，其中 u 軸指向載具的正前方， w 軸指向無人船的正下方，而 v 軸的方向滿足右手定則，如圖 3.4 所示。繞著 u 軸旋轉的角度稱為橫搖角(roll angle)，繞著 v 軸旋轉的角度稱為縱搖角(pitch angle)，繞著 w 軸旋轉的角度稱為平擺角(yaw angle)。

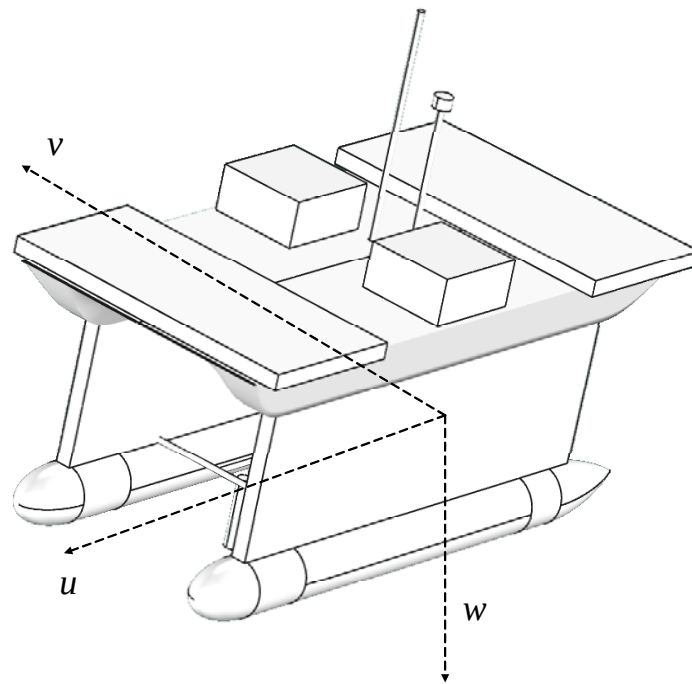


圖 3.4 附體座標系統

3.2 延伸型卡爾曼濾波器運用於無人船定位

本計畫利用 AIS 的 GPS 資訊並結合延伸型卡爾曼濾波器來修正慣性感測器的定位資訊。

3.2.1 狀態預測

延伸型卡爾曼濾波器定位之狀態向量定義為無人船在 ECEF 座標系統中的位置以及航向角。狀態向量分別於時間 $t-1$ 與時間 t 表示成 $x_{t-1} = (x_{e,t-1}, y_{e,t-1}, z_{e,t-1}, \psi_{e,t-1})^T$ 與 $x_t = (x_{e,t}, y_{e,t}, z_{e,t}, \psi_{e,t})^T$ 。因為無人船的狀態向量以 ECEF 座標系統為基準，所以感測器所量測到的資訊必須先做座標轉換 $v^n = R_b^n v^b$ ，或：

$$\begin{bmatrix} v_n \\ v_e \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

v^b 為一在附體座標系統的向量， v^n 為一在 NED 座標系統的向量。兩個向量之間的關係可以用旋轉矩陣 R_b^n 表示。此旋轉矩陣可以定義成尤拉角 (ϕ, θ, ψ) 三次分別的旋轉，其中 ϕ 代表橫搖角， θ 代表縱搖角， ψ 代表平擺角。無人船上的導航儀器將提供前進速度與偏航角，將上式改寫為二維平面上的導航方程式：

$$\begin{bmatrix} v_n \\ v_e \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_u \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} v_n \\ v_e \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_u \cos \psi \\ v_u \sin \psi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

令 v^e 為一在 ECEF 座標系統之向量。無人船的前進速度於 NED 座標系統須轉到 ECEF 座標系統。

$$v^e = R_n^e v^n \quad (3.4)$$

其中 R_n^e 為 NED 座標系統至 ECEF 座標系統之旋轉矩陣。此旋轉矩陣可以拆成兩個旋轉步驟。(1) 以 z_e 軸為旋轉軸旋轉 l 度，其中 l 為地球的經度。(2) 以 y' 軸為旋轉軸旋轉 μ 度，其中 μ 為地球的緯度。如圖 3.5 所示。

(3.4) 式即為：

$$\begin{bmatrix} v_{x_e} \\ v_{y_e} \\ v_{z_e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos l \sin \mu & -\sin l & -\cos l \cos \mu \\ -\sin l \sin \mu & \cos l & -\sin l \cos \mu \\ \cos \mu & 0 & -\sin \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n \\ v_e \\ v_d \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

由(3.3)可得

$$\begin{bmatrix} v_{x_e} \\ v_{y_e} \\ v_{z_e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-\cos l \sin \mu)v_u \cos \psi + (-\sin l)v_u \sin \psi \\ (-\sin l \sin \mu)v_u \cos \psi + (\cos l)v_u \sin \psi \\ \cos \mu(v_u \cos \psi) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

狀態向量之估測表示如下：

$$\begin{cases} \bar{x}_{e,t} = x_{e,t-1} + v_u (-\cos l \sin \mu \cos \psi + -\sin l \sin \psi) \Delta t \\ \bar{y}_{e,t} = y_{e,t-1} + v_u (-\sin l \sin \mu \cos \psi + \cos l \sin \psi) \Delta t \\ \bar{z}_{e,t} = z_{e,t-1} + v_u (\cos \mu \cos \psi) \Delta t \\ \bar{\psi}_t = \psi_t \end{cases} \quad (3.9)$$

狀態向量之變化量之可表示為：

$$G_t = \frac{\partial \bar{x}_t(t)}{\partial x_{t-1}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & v_u [\cos l \sin \mu \sin \psi + (-\sin l \cos \psi)] \Delta t \\ 0 & 1 & 0 & v_u (\sin l \sin \mu \sin \psi + \cos l \cos \psi) \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & -v_u \cos \mu \sin \psi \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.2.2 狀態更新

延伸型卡爾曼濾波器的狀態更新步驟將利用 GPS 的定位資訊。GPS 的量測值以 (μ, l, h) 座標系統表示，其中 μ 表示地球緯度， l 表示地球經度， h 表示高度。在轉換中所需的所有參數以及定義如圖 3.6 所示

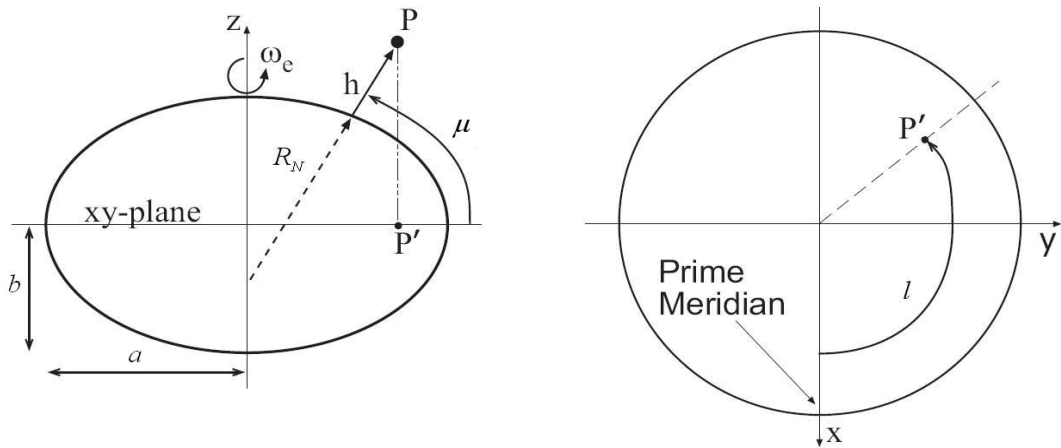


圖 3.6 WGS84 座標系

表 3.1 WGS84 參數

參數	值	註釋
a	6378137m	橢圓的半長軸
b	6356752.314m	橢圓的半短軸
e	0.08181919	橢圓偏心率
R_N	$\frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2(\mu)}}$	曲率半徑

此研究將使用 WGS84 座標系統，參數的註釋及值列於表 3.1。以下則為 $(X_e Y_e Z_e)$ 轉至 (μ, l, h) 之演算法：

1. 求解經度

$$l = \arctan2(y_e, x_e) \quad (3.11)$$

2. 求解緯度及高度

a. 初始化：令

$$h = 0 \quad (3.12)$$

$$R_N = a \quad (3.13)$$

$$p = \sqrt{x_e^2 + y_e^2} \quad (3.14)$$

b. 利用疊代方法至收斂為止

$$\sin(\mu) = \frac{Z_e}{(1-e^2)R_N + h} \quad (3.15)$$

$$\mu = \arctan((z + e^2 R_N \sin(\mu)) / p) \quad (3.16)$$

$$R_N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\mu)}} \quad (3.17)$$

$$h = \frac{p}{\cos(\mu)} - R_N \quad (3.18)$$

若 (μ, l, h) 座標系統之值已知，則可以利用下列公式轉換至 ECEF 座標系統 $(X_e Y_e Z_e)$ 。

$$x_e = (R_N + h) \cos(\mu) \cos(l) \quad (3.19)$$

$$y_e = (R_N + h) \cos(\mu) \sin(l) \quad (3.20)$$

$$z_e = [R_N(1 - e^2) + h] \sin(\mu) \quad (3.21)$$

由於 GPS 的定位資訊為經緯度，故更新步驟的量測模型必須利用 (3.19)、(3.20) 和 (3.21) 式轉至 ECEF 座標系統。量測模型定義為：

$$Z_t = \begin{bmatrix} x_{e,t}^{GPS} \\ y_{e,t}^{GPS} \\ z_{e,t}^{GPS} \\ \psi_{e,t}^{GPS} \end{bmatrix} + Z_t^{GPS-Noise} \quad (3.22)$$

$$H_t = \frac{\partial z_t}{\partial x_t} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

其中 $x_{e,t}^{GPS}$, $y_{e,t}^{GPS}$ 和 $z_{e,t}^{GPS}$ 為於 ECEF 座標系統中 GPS 所得到的無人船位置。 $\psi_{e,t}^{GPS}$ 為 GPS 資訊中的無人船航向角。圖 3.7 為延伸型卡爾曼濾波器定位流程圖，表 3.2 為導航信號處理流程。由圖 3.7 可知，最後會將無人船於 ECEF 座標系統的位置轉到經緯度，此步驟是為了方便與 Google Maps 結合，其步驟於下一節中說明。

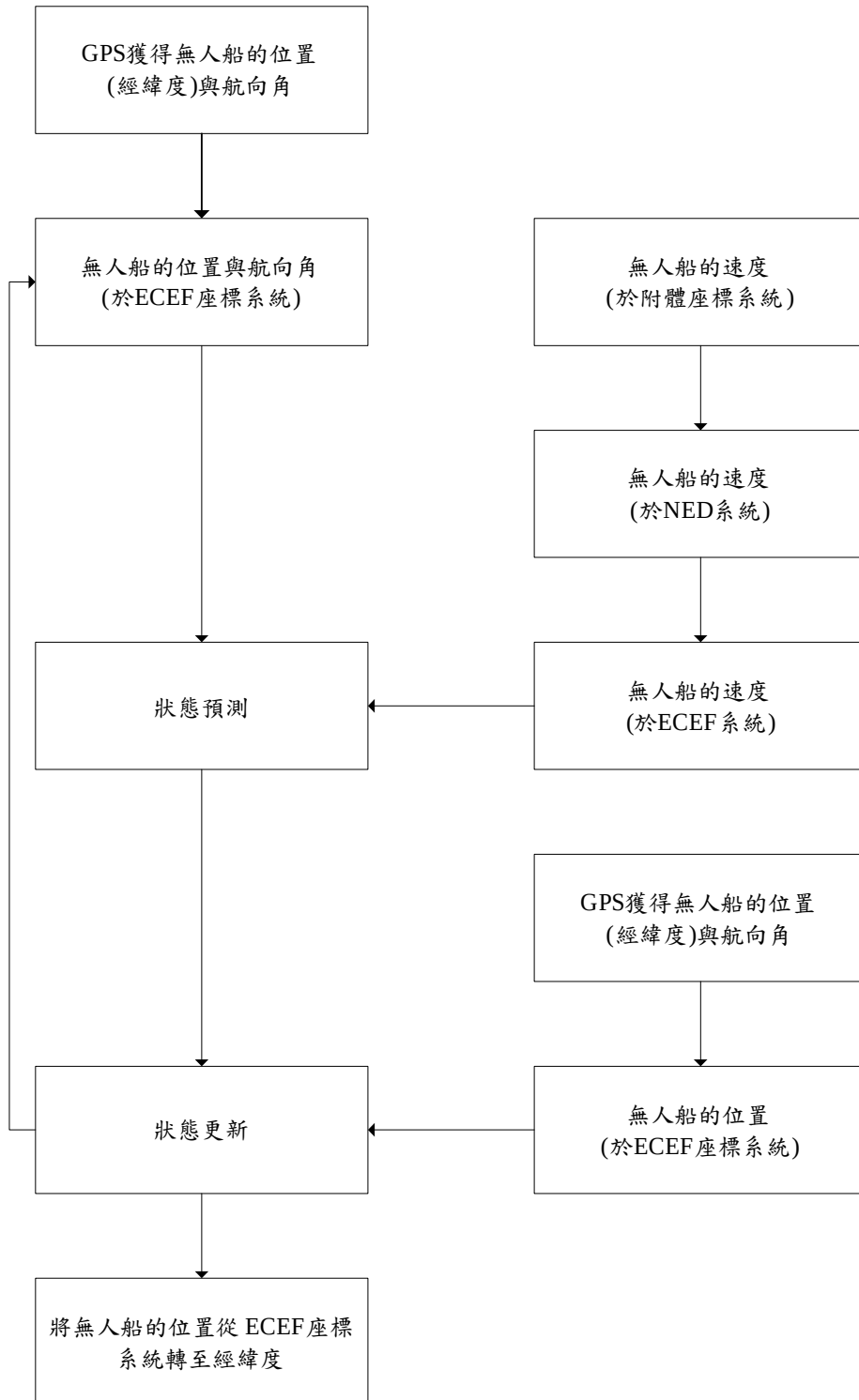


圖 3.7 延伸型卡爾曼濾波器定位流程

表 3.2 延伸型卡爾曼濾波器定位演算法

$$1. \quad G_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & v_u [\cos l \sin \mu \sin \psi + (-\sin l \cos \psi) \Delta t] \\ 0 & 1 & 0 & v_u (\sin l \sin \mu \sin \psi + \cos l \cos \psi) \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & -v_u \cos \mu \sin \psi \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$2. \quad \bar{x}_t = \begin{bmatrix} x_{e,t-1} + v_u (-\cos l \sin \mu \cos \psi + -\sin l \sin \psi) \Delta t \\ y_{e,t-1} + v_u (-\sin l \sin \mu \cos \psi + \cos l \sin \psi) \Delta t \\ z_{e,t-1} + v_u (\cos \mu \cos \psi) \Delta t \\ \psi_t \end{bmatrix}$$

$$3. \quad \bar{\Sigma}_t = G_t \Sigma_{t-1} G_t^T + R_t$$

$$4. \quad \hat{z}_t = \begin{bmatrix} x_{e,t}^{GPS} \\ y_{e,t}^{GPS} \\ z_{e,t}^{GPS} \\ \psi_t^{GPS} \end{bmatrix}$$

$$5. \quad z_t = \begin{bmatrix} x_{e,t}^{GPS} \\ y_{e,t}^{GPS} \\ z_{e,t}^{GPS} \\ \psi_{e,t}^{GPS} \end{bmatrix} + z_t^{GPS-Noise}$$

$$6. \quad H_t = \frac{\partial \hat{z}_t}{\partial x_t} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$7. \quad K_t = \bar{\Sigma}_t H_t^T (H_t \bar{\Sigma}_t H_t^T + Q_t)^{-1}$$

$$8. \quad x_t = \bar{x}_t + K_t (z_t - \hat{z}_t)$$

$$9. \quad \Sigma_t = (I - K_t H_t) \bar{\Sigma}_t$$

$$10. \text{Return } x_t, \Sigma_t$$

3.3 Google Maps 遙控介面

為了使用者的方便，無人船的導航系統結合了網頁與 Google Maps，圖 3.8 為無人船遙控系統的架構。使用者可以在網頁上決定要探勘的範圍，決定之後網頁就會把所有路徑點的經緯度規劃出來，這時基地站就會與網路空間連線並把路徑點的經緯度資料下載下來，然後再把資料透過 AIS 傳送到無人船上的電腦上，最後無人船就會沿著路徑點的位置前進。無人船每過一段時間就會照著原來的傳輸路徑回報自己所在的位置，操作者就可以上網頁查看無人船的位置並適時的下達新命令。

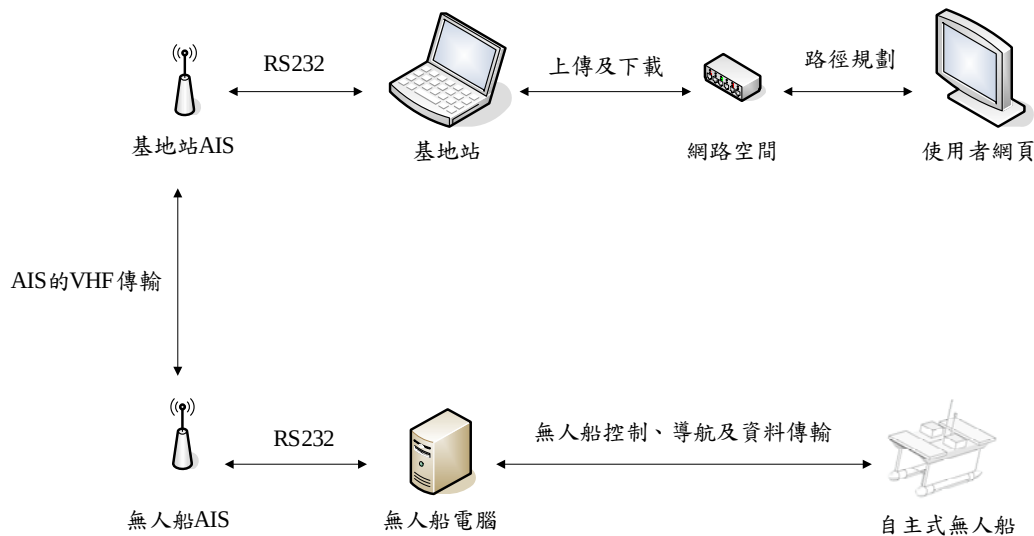


圖 3.8 無人船遙控系統架構

3.3.1 Google Map API

Google 公司在衛星影像地圖的服務提供了兩項免費的應用程式分別為 Google Maps 與 Google Earth。Google Maps 是為網路分享所設計

的電子地圖而且只要電腦有網路瀏覽器就可以使用。Google Earth 則是著重於 3D 模型方面的技術且在使用之前必須先下載安裝軟體。Google Maps 在支援地圖上標記、繪製圖形等動作較多元，並可以直接將結果分享在網路上與其他人共享。反觀 Google Earth 在這兩方面的功能比較缺乏，所以在無人船的導航系統選用 Google Maps 作為整合的應用軟體。

Google Maps API (Applications Programming Interface) 是一個連接網頁程式與Google Maps的必備工具，程式撰寫者可以透過API的程式庫開發 Google Maps的服務。在使用Google Maps API的程式庫之前必須先跟Google申請一組Google Maps API的金鑰，把這組金鑰嵌入自己的網頁後即可以開始使用API的各項功能。

3.3.2 使用者網頁設計

無人船導航系統的使用者網頁由 Dreamweaver 搭配網路程式語言 PHP 與 JavaScript 以及 Google Maps API 所組成，外觀如圖 3.9 所示。

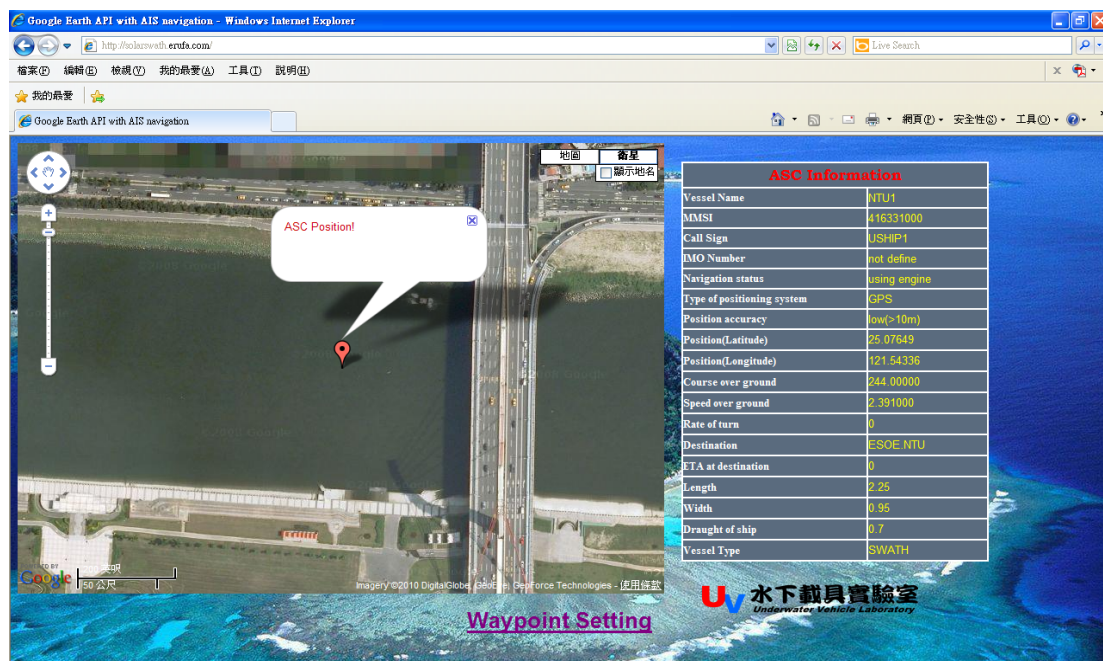


圖 3.9 使用者網頁

在使用者網頁的左半部顯示無人船的所在位置，即圖上的紅點。在右半部則顯示無人船的各種資訊如載具名稱、載具大小、位置經緯度、速度、航向角等。這些資訊都是透過 AIS 傳送到岸上的基地台再利用網路上傳到網站空間，此外網頁每五秒更新一次，讓使用者能夠清楚收集到無人船的最新資訊。

點選網頁下面 Waypoint Setting 的字樣之後即可進入路徑規劃的網頁中，如圖 3.10 所示。使用者可以決定無人船探測的海域範圍大小，並輸入欲將此範圍分成多少等份以及此範圍的角度，完成之後網頁程式就會開始計算每個路徑點的經緯度值，並將這些經緯度資料下載到岸上的基地站，基地站再透過 AIS 傳送到無人船上的電腦並開始執行探測任務。

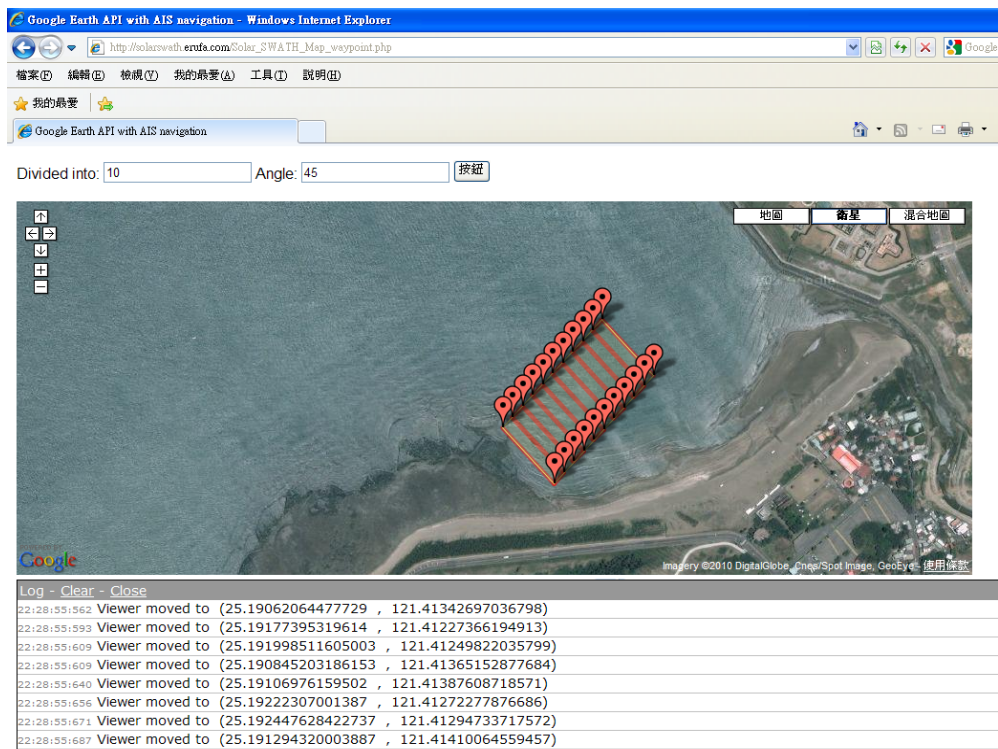


圖 3.10 探測範圍為 45 度矩形，分割成十等份之路徑點規劃

第四章 無人船太陽能發電量與探測能力

本章描述無人船太陽能發電系統之架構，以及發電量對無人船探測能力之評估。首先依據太陽能板及無人船負載等特性，進行無人船的太陽能發電量估算，接著討論採樣間格與能量需求之關係，評估太陽能發電量對量測面積與船速之影響。

4.1 電力系統

無人船的太陽能發電系統主要由下列組件所構成，包括：發電組件—太陽能電池；蓄電組件—鋰電池；負載組件—工業電腦，AIS 及其他感測器。而將這三種組件整合成一獨立的發電系統則需要太陽能控制器。

4.1.1 太陽能電池

一般來說，太陽能電池是由 P-N 接面的二極體所組成，並能將光能轉換成電能，因此我們可以將太陽能電池視為一獨立電流源來供給負載電力。太陽能電池之等效電路可由圖 4.1 表示，其中 I_{ph} 表示太陽能電池經陽光照射後產生之電流， D_j 表示一 PN 接面二極體，而 R_{sh} 與 R_s 則分別表示材料內部的等效串聯及並聯阻抗[17]，通常 R_{sh} 值很小，因此為了簡化分析過程而可將之忽略不計。 V_{pv} 及 I_{pv} 分別表示輸出至外接負載 R_L 的電壓及電流。

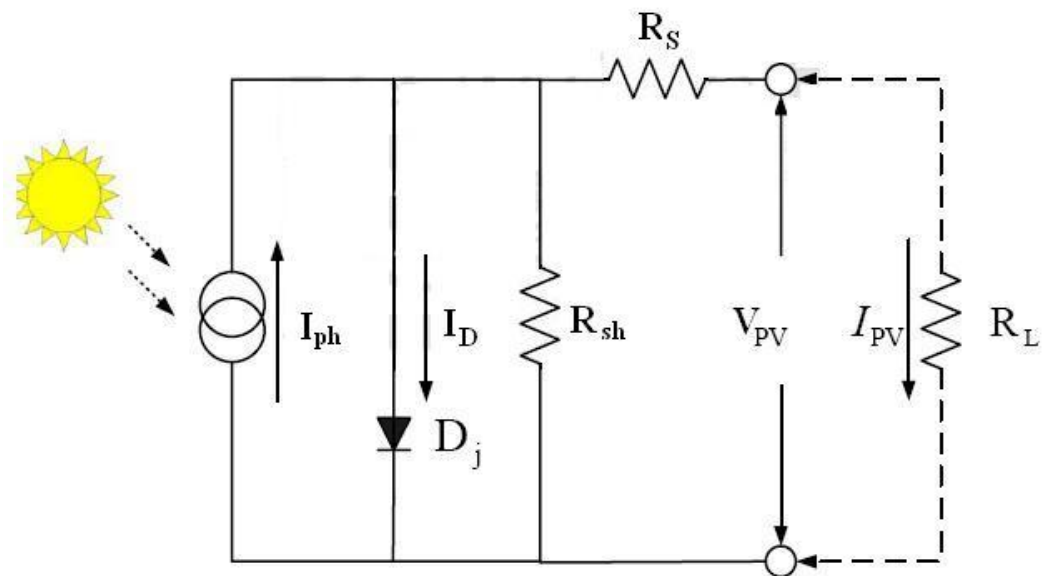


圖 4.1 太陽能電池等效電路

省略 R_{sh} 後的電路模型與 [18] 所提出的等效電路模型相同，太陽能電池的輸出電流可表示成(4-1)。

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{AK_bT} \right)} - 1 \right) \quad (4-1)$$

上式中各參數定義為：

I_{pv} ：太陽能電池的輸出電流(A)

V_{pv} ：太陽能電池的輸出電壓(V)

I_{ph} ：太陽能電池短路電流(A)

I_{sat} ：二極體的逆向飽和電流(A)

K_b ：波茲曼常數(1.38×10^{-23} J/K)

A ：太陽能電池的二極體因數($A=1 \sim 2$)

q ：一個電子所含電荷量(1.6×10^{-19} C)

另外，太陽能電池的逆向飽和電流 I_{sat} 與溫度的變化相關，因此可以使用數學方程式(4-2)來表示：

$$I_{sat} = I_{Tr} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 e^{\frac{qE_{gap}}{AK_b} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)} \quad (4-2)$$

T_r ：太陽能電池參考溫度(K)

I_{Tr} ：太陽能電池在溫度(T_r)時的逆向飽和電流(A)

E_{gap} ：半導體材料跨越能間帶間隙時所需能量(eV)

而太陽能電池所產生的電流則會隨著日照強度及溫度變化而改變，其數學方程式為(4-3)

$$I_{ph} = G I_{scr} (1 + K_0 (T - T_r)) \quad (4-3)$$

I_{scr} ：太陽能電池於參考溫度和日照強度為 1KW/m^2 時所量測到之短路電流值(A)

K_0 ：太陽能電池短路電流的溫度係數(mA/K)

G ：太陽日照強度($G=1$ 即為 1000W/m^2)

從以上的數學方程式可以得知，日照強度及溫度是影響太陽能電池功率的最大因素。藉由聯立(4-1)、(4-2)及(4-3)，可以繪出太陽能電池的輸出 I-V 曲線及 P-V 曲線在不同的日照強度及溫度下的關係。本

計劃所使用的太陽能電池是從達逸光電有限公司出產之單晶矽太陽能模組(TDA-1400 圖 4.2)，其詳細的電力規格如表 4.1 所示。

表 4.1 太陽能板模組(TDA-1400)規格

參數	符號	數值	單位	備註
最大功率	P_{max}	140.26	W	irradiance: 1000W/m ² temperature: 25°C
最大功率電壓	V_{pm}	17.59	V	
最大功率電流	I_{pm}	7.973	A	
開路電壓	V_{oc}	22.93	V	
閉路電壓	I_{sc}	9.34	A	
模組效率	η	16.85	%	

由 (4-1)、(4-2)及(4-3)，與表 4.1 所列之參數可以得出太陽能板模組(TDA-1400)在日照強度 1000W/m²、溫度 25 度的環境下的 I-V 曲線及 P-V 曲線(圖 4.2, 4.3)。

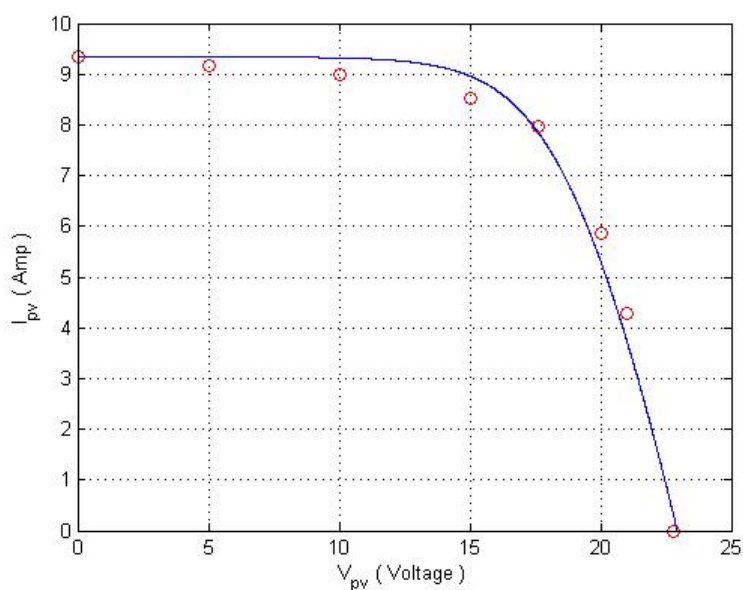


圖 4.2 (TDA-1400)在標準環境(1000W/m² 25°C)下的 I-V 曲線

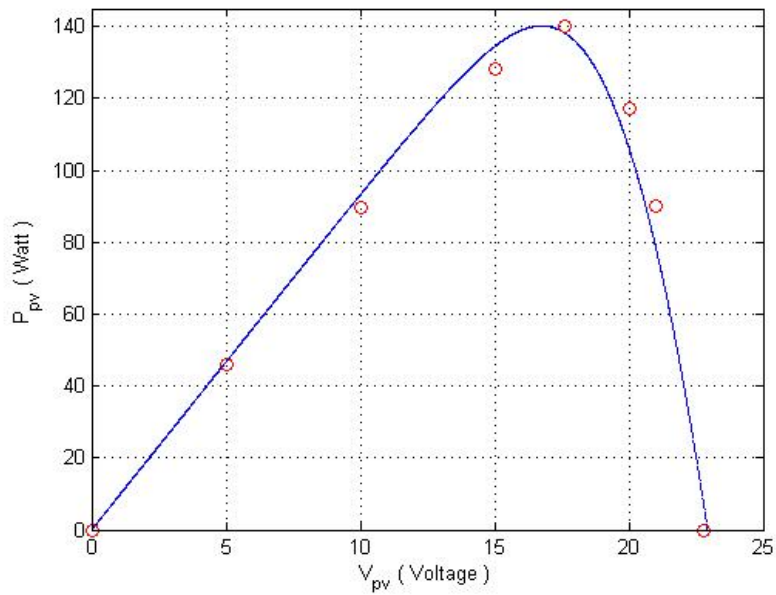


圖 4.3 (TDA-1400)在標準環境(1000W/m^2 25°C)下的 P-V 曲線

圖 4.2 及圖 4.3 中的紅色圓圈為產品規格書所提供之太陽能電池的試驗數據，用以確認本節太陽能模式之正確性。

4.1.2 鋰離子電池

鋰離子電池是目前最受矚目的二次電池。在鋰電池殘電量(state of charge, SOC)估測的部份，文獻[18]整理電池殘電量檢測法，包括：直接放電法、開路電壓法及安培小時法等等；直接放電法是求得電池殘電量最直接的方法，但是缺點是每做一次需要花費許多時間，且電池必須與系統斷開才能檢測，不適用於無人船的系統。而開路電壓法則必須考慮電池的特性，鋰離子電池的開路電壓與 SOC 的關係並不像鉛酸電池呈線性變化[19]，在判斷 SOC 時容易因為測量上的誤差而導致

誤判，最適合應用於無人船平台的估測方法則為安培小時法。

安培小時法是利用能量平衡的原理，量測流入或流出電池的電流量：充電時，由初始 SOC 值加上電流對充電時間的積分值；放電時，則由初始 SOC 減去電流對放電時間的積分值，如此便可以得出任何時刻的 SOC 值。其計算公式如下[18]：

$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t I_{batt}(t) dt \quad (4-4)$$

其中 t 表示目前時間， t_0 為初始時間， SOC 為目前殘電量值， SOC_0 為初始殘電量值， C_N 為公稱電壓， I_{batt} 為電池的電流(流入為正，流出為負)。本計畫將會把鋰離子電池的充放電保護及 SOC 殘電量的估測建立於系統硬體中。

4.1.3 負載計算

無人船的太陽能發電系統主要的負載為工業電腦、船舶自動識別系統(AIS)及水下攝影機及都卜勒聲納。而負載的部份又可以分成需要維持開機狀態的常駐負載，以及每間隔固定時間開啟一次的間歇性負載等。在無人船平台中需要長時間維持運轉的負載為工業電腦及都卜勒聲納；工業電腦選用艾訊股份有限公司的 eBOX530-820-FL(圖 4.4)，其啟動與正常運作所需功率約 25W。另外根據廠商所提供的規格，都卜勒聲納運作所需功率需 3W。



圖4.4 工業電腦eBOX530-820-FL外觀

在無人船平台中可以間隔固定時間啟動的負載為 AIS 及水下攝影機。其中水下攝影機運作所需功率需 6W，而 AIS 在經過實際進行收發 GPS 訊號測試時，觀測其電源供應器所示電壓為 24V，電流為 1A(如圖 4.5)，因此 AIS 運作所需功率為 24W。



圖4.5 AIS運作所需功率之量測

在間歇性負載方面，根據 [20]所提出的負載耗電量估測方法，耗電量等於負載乘上週期時間內的實際工作周期(duty ratio)。因此考慮無人船定位的實際運行模式，每隔二十分鐘開啟所有間歇性負載一次，同時每次開啟五分鐘來進行無人船的 GPS 定位來計算，平均一個小時

AIS 所需要的電量為

$$24(W) \cdot \frac{5(\text{min}) \cdot 4(\text{times})}{60(\text{min})} = 8(Wh) \quad (4-5)$$

同時考慮水下攝影機的實際運作狀況，平均一小時約有二十分鐘的運作時間，因此其所耗電量約為

$$6(W) \cdot \frac{20(\text{min})}{60(\text{min})} = 2(Wh) \quad (4-6)$$

將(4-5)、(4-6)式加總後，可得間歇性負載一小時所需電量約為 10Wh。

最後將常駐負載一小時所消耗的電量 28Wh 與間歇性負載的消耗電量 10Wh 加總後，即可得出無人船平台每一小時負載平均所需電量為 38Wh。

4.2 太陽能發電系統模擬

無人船太陽能發電系統的連接方式可由圖 4.6 表示，將太陽能電池、鋰離子蓄電池與負載三個組件並聯。由於太陽能電池發電量大於負載用電量時，其多餘電量可由蓄電池吸收，相反的當太陽能電池發電量小於負載時，則蓄電池將會補足不夠的電量，因此鋰離子電池在無人船太陽能發電系統中扮演著能量管理的重要角色。

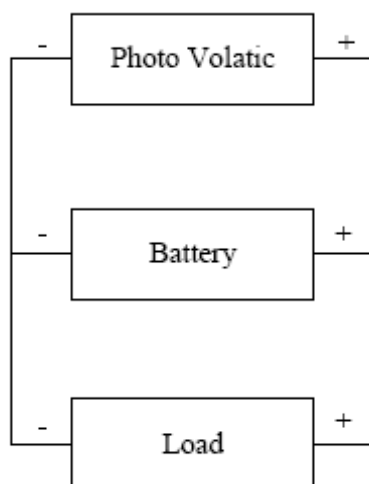


圖4.6 獨立型太陽能發電系統連接方式

為了選定適合應用於無人船系統的蓄電池容量大小，必須模擬系統的發電與放電情況。本計畫所建立之模擬工具，包含下列部份：逐時日照強度資料以換算成發電量；利用系統能量平衡的原理，分析太陽能發電量、鋰電池的充放電與負載之間各組件的關係等。

為了要針對無人船太陽能發電系統做模擬，必須得知太陽相對於

太陽能板的移動軌跡以估出全年的日照強度理論值，接著再導入從氣象局所購得之太陽輻射資料以作為修正，即可得出較準確的太陽能輻射資料，最後將此資料代入 4.1 節中太陽能板(TDA-1400)的模式，即完成無人船的太陽能發電量模擬，並可從此模擬結果做無人船電量與量測任務規劃之匹配。

根據[21]對於太陽的運動描述，以方位角(surface azimuth angle，向南為 0 度，東為正值，西為負值)和太陽高度角(solar elevation angle)來表示太陽相對於地球上觀察者的位置(如圖 4.7)。

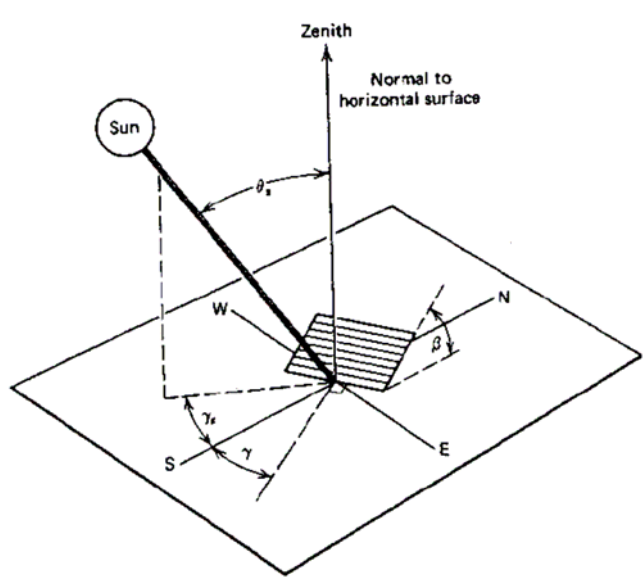


圖4.7 太陽方位定義[21]

定義下列參數：

β ：觀察者所在傾斜面與水面之夾角

θ_z ：水平面上觀察到的太陽高度角

γ_s ：方向角

θ ：太陽光相對於傾斜面法線的入射角

ω ：時角(hour angle)

δ ：太陽赤緯(solar declination)

ϕ ：緯度

d ：一年中的第 d 天

根據以上的定義，可得從參考點的方位資料及時間得到太陽相對於參考點的位置。而以上各參數間關係如下式：

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cdot \\ & \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (4-7)$$

$$\gamma_s = \sin^{-1}(\sin \phi \sin \omega + \cos \phi \cos \omega \cos \delta) \quad (4-8)$$

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360(284 + d)}{365}\right] \quad (4-9)$$

依據太陽工程學的幾何公式與經驗公式可計算斜面所照射到的日照強度，本節先計算出晴空下水平輻射量的理論值 I_c ，接著運用氣象局提供的水平輻射資料 I ，並藉由經驗公式將輻射量資料分離成直達輻射量 I_b 及漫射輻射量 I_d ，最後再將這兩種輻射量轉換至斜面上。根據[21]的所述， I_c 可看成是由直達輻射量 I_{cd} 與漫射輻射量 I_{cb} 所組成。假設

I_o 為太氣層外相對於觀察者所在的水平面的晴天日照強度，其公式如下

所示：

$$I_o = 1363 \cdot [1 + 0.033 \cdot \cos(\frac{360d}{365})] \cdot \cos \theta_z \quad (4-10)$$

$$I_{cb} = I_o \cdot \tau_b \quad (4-11)$$

$$\tau_b = a_0 + a_1 e^{-K / \cos \theta_z} \quad (4-12)$$

其中 τ_b 為穿透係數；而 a_0 、 a_1 及 K 是在考慮季節因素後，晴空下觀察位置為離海面高度 h 的參數，其單位為公里。

$$a_0 = [0.4237 - 0.00821 \cdot (6 - h)^2] \cdot r_0 \quad (4-13)$$

$$a_1 = [0.5055 + 0.00595 \cdot (6.5 - h)^2] \cdot r_1 \quad (4-14)$$

$$K = [0.2711 + 0.01858 \cdot (2.5 - h)^2] \cdot r_K \quad (4-15)$$

式中 r_0 、 r_1 、 r_K 為季節參數，其數值可由表 4.2 得知。

表4.2 季節相關係數[22]

天氣類型	r_0	r_1	r_K
春	0.95	0.98	1.02
夏	0.97	0.99	1.02
秋	0.99	0.99	1.01
冬	1.03	1.01	1.00

接著考慮漫射輻射量 I_{cb} 如下式所示。其中 τ_d 為漫射係數。

$$I_{cd} = I_o \cdot \tau_d \quad (4-16)$$

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939\tau_b \quad (4-17)$$

最後再將直達輻射量 I_{cd} 與漫射輻射量 I_{cb} 加總，即可得出晴空下水平輻射量的理論值 I_c 。

$$I_c = I_{cb} + I_{cd} \quad (4-18)$$

假設從氣象局取得之水平輻射量 I ，同樣可分成直達輻射量 I_b 及漫射輻射量 I_d ，然而由於兩種輻射量轉換至斜面的方式不同，因此必須先將之分離[22]。

$$I = I_b + I_d \quad (4-19)$$

其分離的方式是根據 [23]所提出之公式，先求得參數 $m=I/I_c$ 其中 I_c 為晴空下水平輻射量的理論值。接著將 m 代入下列經驗公式，即可求得水平漫射輻射量 I_d ，由(4-19)式則可求得水平直達輻射量 I_b [21]。

$$\begin{aligned}
 I_d / I &= 1 - 0.1m & 0 \leq m < 0.48 \\
 I_d / I &= 1.11 + 0.0396m - 0.789m^2 & 0.48 \leq m < 1.10 \\
 I_d / I &= 0.2 & 1.10 \leq m
 \end{aligned} \tag{4-20}$$

在分離出漫射輻射量 I_d 及直達輻射量 I_b 後，利用圖 4.8 所描述之水平面夾角 β 的幾何關係，即可將直達輻射量 I_b 轉換成傾斜面上的直達輻射量 I_{tb} ；而漫射輻射量 I_d 及轉換成傾斜面上的直達輻射量 I_{td} 。

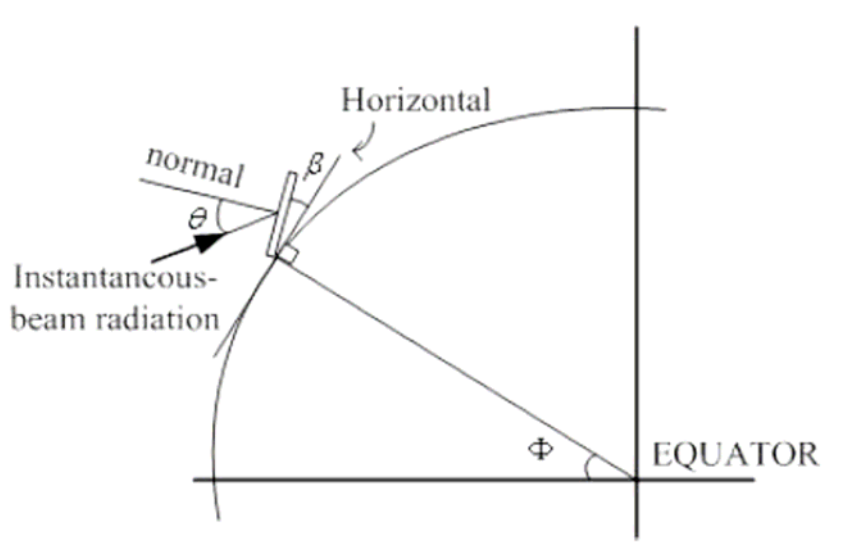


圖4.8 傾斜面上所受的日照強度[21]

$$I_{tb} = I_b \cdot \cos \theta \tag{4-21}$$

$$I_{td} \cong I_d \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (4-22)$$

除了直達及漫射輻射量之外，還必須考慮地面的反射率 Γ 的影響。根據[21]， Γ 在一般地面上為0.2，在水面上為0.7。假設反射輻射量為 I_G ，其式子為(4-23)所示：

$$I_G \cong I \cdot \Gamma \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (4-23)$$

最後將上述三種輻射量加總後可得出總輻射量 I_t 。

$$I_t = I_{tb} + I_{td} + I_G \quad (4-24)$$

得出總輻射量後，將此資料代入4.1節中太陽能板(TDA-1400)的計算模式，以完成太陽能發電量之估算。

在模擬程式中，使用者先讀入由氣象局所購得之逐時太陽能輻射資料，接著再輸入所在地理位置的經緯度、高度、太陽能傾斜角、負載耗電量上限以及鋰電池蓄電量上限等資料，可計算得在不同的時間點，無人船從太陽能板所能得到的電力狀況。

若以一日的電量來看，我們藉由此程式來比較冬天與夏天不同的日照情況下，可獲取的電量(圖4.9)。在夏天的日照下，兩片太陽能板

一天所能獲得的電量約為1.3KW-hr；在冬天則因陽光照射角的偏移使得發電量減低，約為0.8KW-hr。

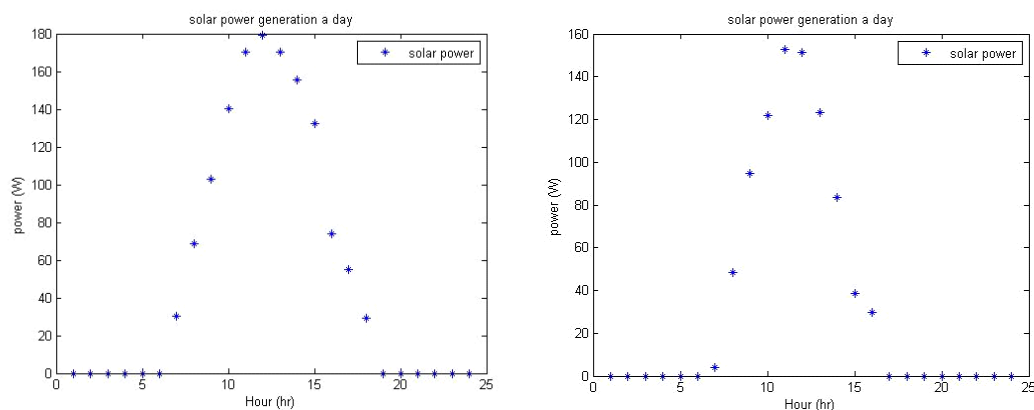


圖4.9 無人船在不同的季節可獲得之電量狀況

(左邊是夏天右邊是冬天的日照)

4.3 無人船電力消耗

一般來說，水道量測所採取的路徑為往復式，以等間距的直線路徑對一區域做量測。無人船在執行量測任務所消耗的電量取決於三個因素：量測區域面積，量測路徑間距，以及量測的時間。假設量測的面積大小為 A ，而量測的間距為 λ 時，載具的總行進長度 L 可以下式來表示

$$L \approx \frac{A}{2\lambda} - 2\lambda \approx \frac{A}{2\lambda} \quad (4-25)$$

其中 2λ 為量探測區域各航道間的距離，或是兩次量測點的間距。在已知總探測時間為 τ 的條件下，載具的探測速度如(4-26)所示。

$$V = \frac{L}{\tau} \approx \frac{A}{2\lambda\tau} \quad (4-26)$$

將量測任務所需的時間及速度等資料表示為無人船之能量消耗[24]，則可以評估完成任務所需的電量。

$$E_{tot} = \left[\frac{\rho C_d S V^3}{2\eta} + H \right] \tau \quad (4-27)$$

式中 ρ 表示水的密度， S 表示載具的浸水面積， C_d 表示載具的阻力係數， V 為無人船速度， η 為螺槳的推進效率，而 H 代表載具上電腦及感測器維持正常運作所必須消耗的電量，即無人船之常駐與間歇負載之和。而無人船的阻力係數對速度的關係在第二章中已求得（圖2.5）。表4.3整理無人船電力消耗計算式之各項參數數值。

表4.3 無人船電力消耗計算式各項參數

符號	數值	定義
H	38	酬載 (hotel load)
C_d	圖 2.5	阻力係數 (resistance coefficient)
η	0.35	推進效率 (propulsion efficiency)
S	7.022m^2	浸水面積 (wetted surface)
ρ	(1000kg/m^3)	水密度 (water density)

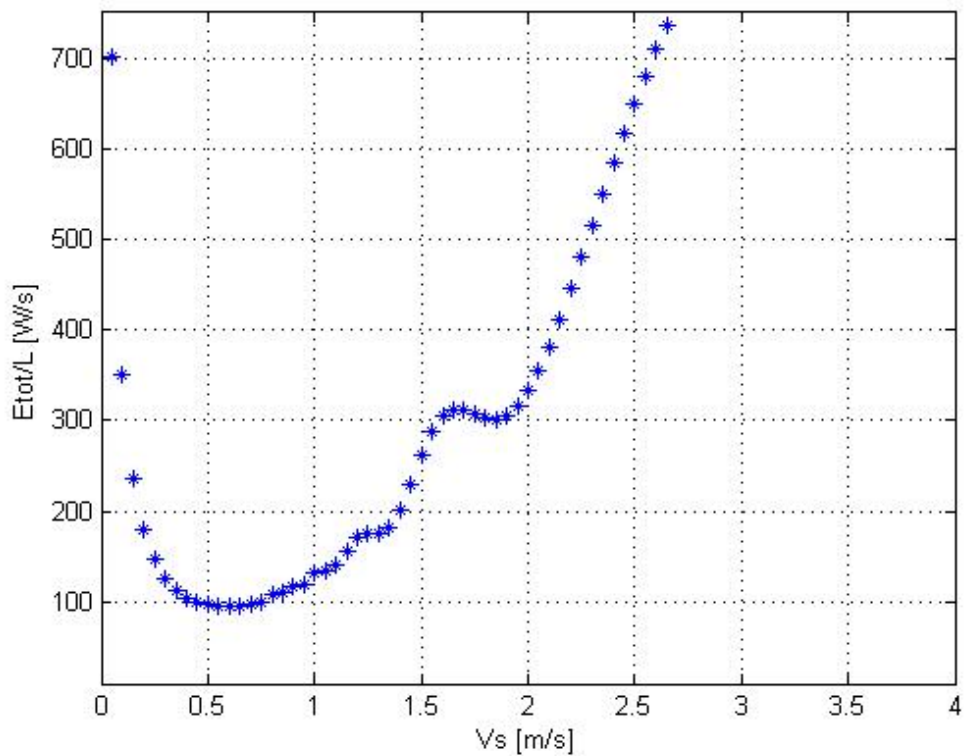


圖4.10 單位長度所消耗之能量與速度之關係

(4-27)中第一項表示無人船於推進時克服阻力所消耗的電量，與前進速度有關，(4-28)表示單位長度下的能量消耗，圖4.10則表示，速度與單位長度下消耗電量的關係。

$$\frac{E_{tot}}{L} = \frac{\rho C_d S V^2}{2\eta} + \frac{H}{V} \quad (4-28)$$

由圖4.10可以得知，於速度 $V=0.65\text{m/s}$ 之單位長度下所消耗的最小能量為 94.77W 。將前述夏季與冬季日照下，單日太陽能發電量 $0.8\sim 1.3\text{kW-hr}$ ，於無人船行進速度為最佳速度($V=0.65\text{ m/s}$)時，可推得無人船依靠太陽能發電所能前進的最大距離約為 $30\sim 47\text{km}$ 。以太陽能單日發電量為 0.8 及 1.3kW-hr ，當作無人船於量測任務中所能消耗的最大電量，則當量測區域為 3km^2 時，路徑間距與量測時間之關係可以圖4.11與圖4.12表示。此二圖中等能量曲線所包圍之右下半部為執行量測任務時，使用者可以選擇的路徑間距以及與其相對應的量測時間。然而考慮水流對運動的影響，以台中港外為例，無人船必須有最小速度為 0.25m/s 的條件限制；其其速度上限受到推進器規格的影响，船速最大必須限制在 5 節內。因此，若考慮海流中可以運作的速度，使用者選取路徑間距及量測時間必須受限在兩條虛線所包含的之內。

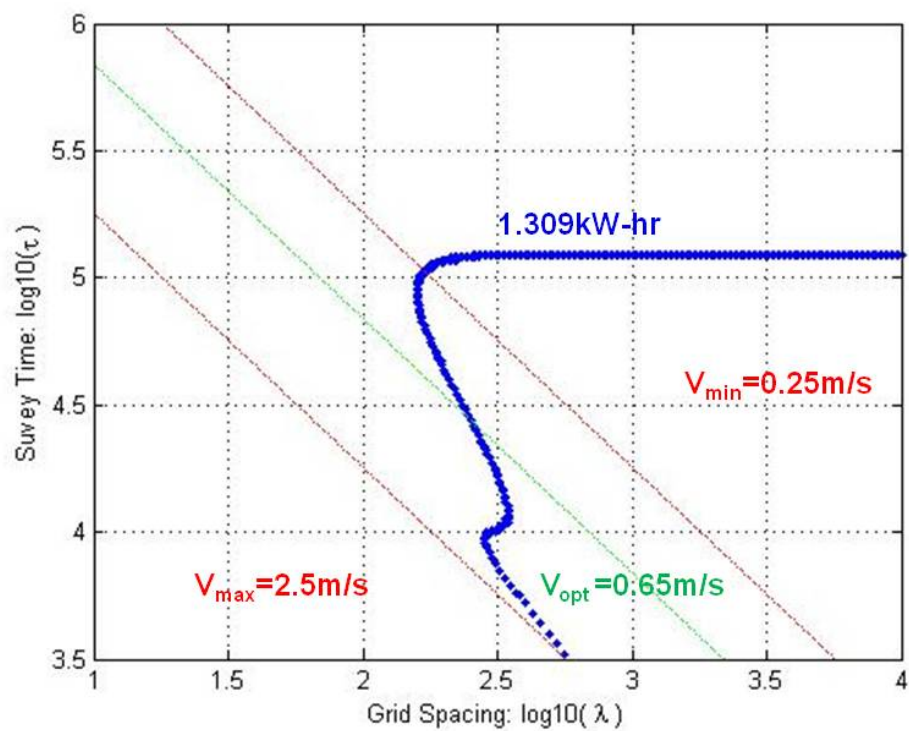


圖4.11 太陽能發電量為1.309kW-hr時，路徑間距及量測時間之關係

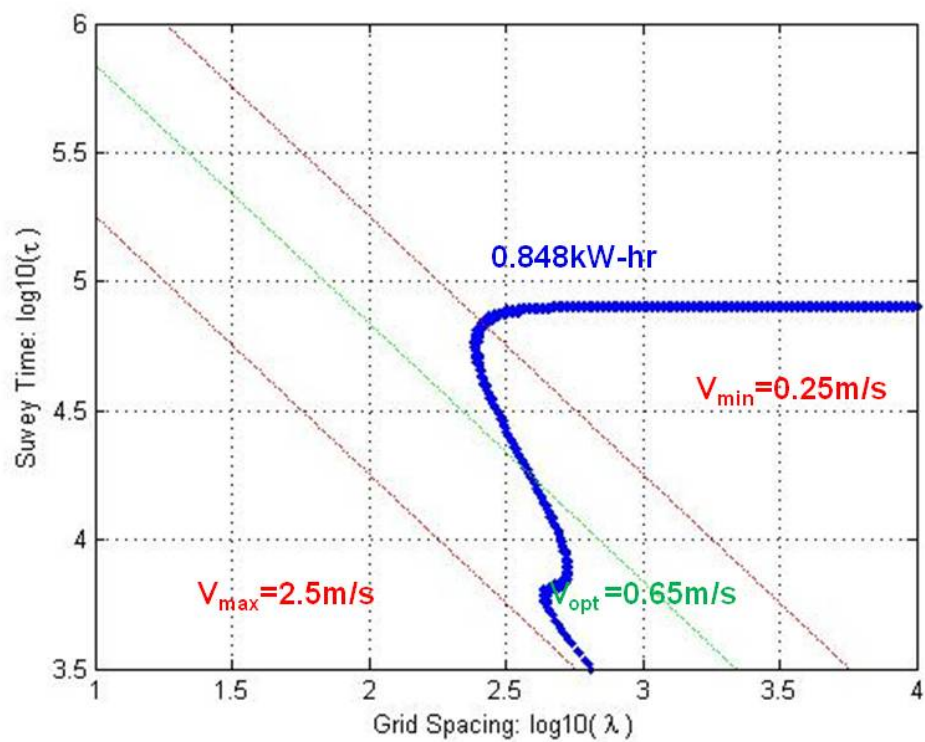


圖4.12 太陽能發電量為0.848kW-hr時路徑間距及量測時間之關係

利用最小速度的虛線 $V_{min}=0.25\text{m/s}$ ，可以將圖4.11、圖4.12簡略分成上下兩部分，就上半部而言，電量的消耗與量測之路徑間距是關連較小，主要受到負載 H 的影響；然而就下半部來說，路徑間距與時間兩者都會對電量的消耗產生影響。

分別就路徑間距與量測時間的角度來看，若欲得到較佳的量測結果而將路徑間距降低，則所需的電量也隨之升高；然而若將量測的速度提高以降低量測時間，則所消耗之電量卻反而隨之減少。因此，根據消耗電量所繪出之路徑間距及時間的關係圖，可用以選擇無人船在能量限制的情況下之適合的量測路徑與速度。

第五章 結論與建議

5.1 結論

本計畫之目的為建立太陽能驅動之智慧型無人船舶，研發近岸海洋資料蒐集、測量、資料傳送與輔助救難之自動控制船舶相關技術。此無人船具有自動導航定位功能，使用太陽能與充電電池驅動，可攜帶多種量測儀器，自動施行港口之水深、水流剖面、地貌等資料蒐集與測量等工作，且可將資料藉由無線電波傳送至岸上之監控電腦。無人船舶之監控與通信採用網路介面與船舶自動識別系統，具有擴充能力，因此本研究之成果在未來可以進一步延伸為架構在無線網路上之無人船隊系統，藉由無人船隻間之相互通訊，可以施行大規模的海岸測量與監控。

本研究計畫所發展之無人船舶使用太陽能及蓄電池為動力來源，為了確保其作業時間長度不受電源有限的影響，未來在推進器之效率方面可持續加以提升。在耐海性能方面，未來可測試更多的波浪條件，以增進本船之海上作業能力。

本年計畫執行依照規劃進度，完成無人船之操控系統設計製作及建立自主式無人船舶之雛型。本期末報告說明無人船設計之進度，包含船舶之外型、阻力預估，以及考慮量測誤差限制條件下的耐海性能設計、無人船遙控操作及導航訊號處理之構想，及無人船太陽能系統

發電量對探測能力影響之評估。

5.2 建議

本研究以四年為期，具體建議後續工作項目與主要研究內容如下：

1. 自主式無人船舶之操控系統設計：建立舵機與螺槳轉速控制之類比系統、建立可程式邏輯控制器與無線數據傳輸、遙控操作介面，以及建立系統硬體監控程式。
2. 自主式無人船舶之定位導航系統設計：建立船舶定位之 DGPS 系統、整合衛星定位、方向計與都卜勒聲納導航資訊、船舶系統鑑定、建立船舶自動駕駛程式。

自主式無人船舶之路徑規劃與任務控制系統設計：整合電子海圖與無人船舶之操控介面、建立自動測量路徑規劃程式、整合路徑規劃程式與自動駕駛程式。

5.3 成果效益與後續應用情形

本計畫完成後之效益及其應用：

- 1.發展國內自製的智慧型太陽能遙控近岸測量自主式無人船舶。
- 2.提供各港務局及測量機構對於施行港口之水深、水流剖面、地形、沈積物資料蒐集與測量等工作之自主式無人船舶系統。
- 3.提升發展藉由無線電波傳送監控之自主式無人船舶電腦相關技術。

參考文獻

1. V Bertram, “Unmanned Surface Vehicles – A Survey,” Technical Report, ENSIETA, 2008.
2. M Caccia, “Autonomous Surface Craft: Prototypes and Basic Research Issues,” Proc. 14th Mediterranean Conference on Control and Automation, June, 2006.
3. H Ferreira, R Martins, E Marques, J Pinto, J Almedida, J Sousa, P Silva, “SWORDFISH: an Autonomous Surface Vehicle for Network Centric Operations,” OCEANS 2007, 2007.
4. J Holler, A Striz, K Bretney, K Kavett, B Bingham, “Design, Construction, and Field Testing of an Autonomous Surface Craft for Engineering and Science,” Oceans 2007, 2007.
5. J Majohr, T Buck, “Modelling, Simulation and Control of an Autonomous Surface Marine Vehicle for Surveying Applications,” “Advances in Unmanned Marine Vehicles, Chapter 16, IEE Press, London, 2006.
6. M Caccia, “ A Practical Approach to Modeling and Identification of Small Autonomous Surface Craft,” IEEE J. Oceanic Engineering, Vol. 33, No. 2, pp. 133-145, April, 2008.
7. E Desa, et. al., “A Small Autonomous Surface Vehicle for Ocean Color Remote Sensing, “ IEEE J. Oceanic Engineering, Vol. 32, No. 2, pp. 353-364, April, 2007.
8. N Cruz, A Matos, S Cunha, S Silva, RDR Frias, “ZARCO-Na Autonomous Craft for Underwater Surveys,” Proceedings of the 7th Geomatic Week, Barcelona, Spain, Feb, 2007.
9. J Alves et. al., “Vehicle and Mission Control of the DELFIM Autonomous Surface Craft,” Proc. 14th Mediterranean Conference on

- Control and Automation, June, 2006.
10. J Curcio, C Kitts, CA Santa Clara, “Self-Positioning Smart Buoys, The “Un-Buoy” Solution: Logistic Considerations using Autonomous Surface Craft Technology and Improved Communications Infrastructure,” Oceans 2006, 2006.
 11. 邱永芳、張富東、郭振華， “智慧型太陽能遙控近岸測量船之研究 (1/4)” ， 交通部運輸研究所研究報告， 2009。
 12. Maxsurf, 3D hull, superstructure and appendage modeling: Version 15.1, FormSys Inc. 2010.
 13. Seakeeper, seakeeping performance prediction: Version 15.1, FormSys Inc., 2010.
 14. CECW-EE/ CECW-OD, Engineering and Design - Hydrographic Surveying, US Army Corps of Engineers, 2002.
 15. T. I. Fossen, Marine Control Systems: Navigation and Control of Ship, Rigs and Underwater Vehicles (Marine Cybernetics AS), Trondheim, Norway, 2002.
 16. J. A. Farrell, Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors, McGraw-Hill, 2008.
 17. G. Walker, “Evaluating MPPT Converter Topologies Using a MATLAB PV Model,” Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 21, No.1, pp.49-55 , 2001.
 18. S. Piller, M. Perrin, A. Jossen, “Methods for State-of-charge Determination and Their Applications,” Journal of Power Sources, Volume 96, Issue 1, pp. 113-120 2001.
 19. G. L. Plett, “Advances in EKF SOC Estimation for LiPB HEV Battery Packs,” Proceedings of the EVS-20, Long Beach, CA, 2003.

20. M. R. Patel, “Wind and Solar Power System—Design, Analysis, and Operation” 2ed Edition, 2005.
21. H. C. Hottel, “A Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation through Clear Atmospheres,” Solar Energy, Vol.18, pp.129-137, 1976.
22. 吳佳峻，“獨立型太陽能發電系統之設計分析與應用”，國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文，2004。
23. 顏仕銘，“獨立型移動式太陽能冰箱系統設計與控制研究”，國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文，2006。
24. A. M. Bradley, ”Low power navigation and control for long range autonomous underwater vehicles” in Proc. 2nd Int. Offshore and Polar Eng. Conf., San Francisco, CA, 1992.

附錄一 期中報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

☒期中☐期末報告審查意見處理情形表

計畫編號： MOTC-IOT-99-H2DB008

計畫名稱：智慧型太陽能遙控近岸測量船之研究(2/4)

執行單位：國立台灣大學工程科學及海洋工程系

審查人員及意見	合作研究單位處理情形
劉景毅 組長： 1. 本研究無人船舶遙控的水平通訊距離有多遠?是不是需要人為導航?是否需要在目視範圍內?航行中若有其它船舶干擾如何避開?以 Google Map 做遙控介面是否有安全的問題，因它反應的不是現場實際狀況，是否會跟其它船隻相撞? 2. 無人船舶設計條件的決定應考慮未來的應用方向，應用與港內或外海側的條件對抗流，抬浪的要求將有所不同，船舶施放與回收的考量亦會有所不同。本研究的無人船舶設計應用方向為何，要較明確說明。 3. 本研究無人船舶的尺寸較迷你，能否應用於碎波帶內或瀉湖內，可架水道間的地形或水流量測?	1. 無人船舶遙控的水平通訊距離受到 VHF 信號的限制，約為 20-30 海里 (37-55 公里)。可以不在目視範圍內，航行中其他船舶可以看見無人船的自動定位信號，同時，無人船也可以定位其他船的位置。以 Google Map 為遙控介面是在離開目視範圍後必要的遙控方式。 2. 無人船舶的應用是根據其在波浪中的運動特性來決定，本報告根據測深機的誤差來定義無人船的工作海況。 3. 無人船的尺寸較小，因此適於在狹長河道、瀉湖等地帶作業。無人船上攜帶之都卜勒聲納、測深機及側掃聲納等可用來量測地形與水流資料。
方志中 教授	

審查人員及意見	合作研究單位處理情形
1. 本船阻力計算公式的軟體應列入參考文獻。 2. 耐海性能分析軟體 Seakeeper 應列入參考之文獻。 3. 本船重心應標示。 4. 本船重力穩度計算、結構強度分析？及波浪中特徵頻率應計算以避免共振發生。 5. 推進器數目如何操控載具？ 6. 電力系統除太陽能外應可接岸電充電設計。	1. 依照委員意見辦理。 2. 依照委員意見辦理。 3. 已標示本船重心。 4. 感謝委員建議，已著手重力穩度計算。結構強度分析將列為未來優先工作。 5. 左右兩座推進器可控制方向角與前進速度，可操作 line-of-sight 導航。 6. 謝謝委員建議，無人船已具岸電之充電設備。
薛憲文 教授： 1. P.4 水深測量、地形調查之差異為何？ 2. 無人船未配備 heave compensator 或 motion sensor，其原因為何？ 3. P.14，“若船體的運動導致量測結果小於 95% 的準確率，則此海況條件將不適宜無人船出海任務...”，請詳加說明其原因？ 4. P.14，“例如：水深 10m 處之容許誤差為 0.5m ...”，請詳加說明其原因？ 5. P.15“若在小於 0.05 之容許範圍內，...”，請說明其單位為何？ 6. P.21-22 提到“...來修正慣性感測器的定資訊”，意即本系統有用慣性感測器？ 7. P.54“根據水道測量的規範，船速最大必須限制在 5 節內。”請說明其原因為何？	1. 謝謝委員指正，地形調查宜改為地貌調查。 2. 無人船配備有 GPS、都卜勒聲納、深度計、水深計、方向計、橫搖、縱搖及艏搖偏角等運動感測器。 3. 此條件為本計畫所訂，藉由限制無人船作業海況，避免船的運動影響水深量測的誤差。 4. 原因如 3 所述。 5. 原因如 3 所述。 6. 本系統有都卜勒聲納、深度計、水深計、方向計、橫搖、縱搖及

審查人員及意見	合作研究單位處理情形
8. 請說明 P.56 中耗電量較低時之較佳測量速度為何？	艏搖偏角等運動感測器，可以量測速度與橫搖、縱搖及平擺角之角度與角速度。 7. 已修正為 “其速度上限受到推進器規格的影響，船速最大必須限制在 5 節內”。 8. 此頁中所推算之量測速度範圍為 0.25-2.5m/s，最佳速度為 0.65m/s。當電量降低時，最佳速度降低，而總量測時間則增加。
黃明志 教授: 1. 表 2.1 無人船尺寸不夠詳細，應包括支柱寬度、長度、甲板尺寸等。 2. 船體阻力估算是否只考慮 bare hull？是否考慮都卜勒聲納、測深儀、螺槳等儀器及其支架之影響。 3. 設計船型總阻力係數是否有在水槽中實驗印證(圖 2.5)。 4. 假設作業區域最大海流流速 0.4m/s，是否太小，過於限制。0.75m/s 之額定航速是否考慮相對速度？ 5. 2.3 節耐海性能預估使用 Seakeeper 軟體結果無水深效應，無航向效應，此與近岸環境不儘相符。 6. roll、pitch、yaw 中文請用造船專有名詞。 7. (3.1)式 3-D 公式無法推化為 (3.2)式 2-D 公式。 8. 表 3.2 中有多個數學符號未經適當定義。 9. (4.1)式 T、P-V 曲線等數學號未經適當定義。	1. 已標注支柱寬度、長度與甲板尺寸等。(表 2.1)。 2. 阻力之計算非 bare hull，而是已包含螺槳、聲納探測儀器、支架等。 3. 已在水槽中驗證，其實驗數值與模擬數據比較如圖 2.6 所示。 4. 本報告所列船速皆為無人船相對於水的速度。最大海流速的限制是因螺槳推力限制，流速必須受到的限制。 5. 謝謝委員指教，由於模擬軟體不具有這項功能，此部分的數據驗證將使用實驗數據。 6. 遵照辦理。 7. 已修正，謝謝指正。 8. 已增加符號定義，謝謝指正。

審查人員及意見	合作研究單位處理情形
	9. 已增加符號定義，謝謝指正。
何良勝 科長： 1. 本研究為 4 年期第 2 年計畫，建議於期末報告中增列前第 1 年之研究成果。 2. 文內部份表格請增列中文說明，例如表 2.1、表 4.1、圖 4.6、表 4.3 等。 3. 本研究所擬之操控系統宜參考應用實際現場之海氣象條件(參考台灣各地海域之海氣象條件)，並宜考慮外在條件可能引致之操控系統的非線性效應影響。 4. 有關本研究之船舶安全性及作業時之限制條件等，建議於期末報告中補充說明。	1. 遵照委員意見辦理。 2. 遵照委員意見辦理。 3. 在未來操控系統的強健特性將以實驗加以驗證。 4. 遵照委員意見辦理。

附錄二 期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

☐期中 ☒期末報告審查意見處理情形表

計畫編號： MOTC-IOT-99-H2DB008

計畫名稱：智慧型太陽能遙控近岸測量船之研究(2/4)

執行單位：國立台灣大學工程科學及海洋工程系

審查人員及意見	合作研究單位處理情形
黃明志 教授: 1. 無人船尺寸在期末報告與期中報告內之數值差異過大，是否只是期中或期末報告中有誤值，或變更設計所致，應說明。 2. 報告中仍有多處錯誤之處請更正： ◎P13 表 2.1→表 2.2 ◎P21 週期公分→秒 ◎P36 ϕ, θ, ψ →橫搖，縱搖，平擺 ◎P39 式(3.2)→(3.3) ◎P42 式(3.22) $\psi_{e,t}^{GPS}$ 3. 期末報告簡報中包含許多測試結果，在書面報告中未呈現，期末報告修正應增補。	1. 無人船之尺寸在期末報告中有經過修改。修改之主要構件為底部二具圓形筒。由 2.25 公尺加長為 2.75 公尺。其吃水深度由 0.5 公尺加大為 0.95 公尺。此項數值之改變，為因應無人船之酬載在期末報告中已陸續裝配完成，並做了防海水浸蝕之設計修正，影響重心位置，因此修改底部圓桶，以調整整體船舶之重心。 2. 遵照辦理，已更正。 3. 謝謝委員意見，遵照辦理。
方志中 教授 1. 設計船速為 0.4m/s，約 0.7 節是否符合委託單位未來實施測量之需求？ 2. 表 2.1 本船吃水設計為 0.95m，船重 496.4kg，但 P31 之圖 2.23 顯示吃水明顯高達甲板，應用於	1. 本船為小型無人儀器承載平台，其設計目的為可在低速、或是靜止下長期停留於海上蒐集資料，與一般船舶之講求運輸速度不同。本船亦可以較大速度運動，但其能量的使用相對較大。 2. 本船在波浪中之運動，已針對台灣沿岸之波浪週期與波高等條

審查人員及意見	合作研究單位處理情形
淺海中是否有限制?(但 P9 之吃水=0.5mm???) 3. 圖 2.11 所示之適合出海之限制，請以數值明列之。以估委託單位未來使用本船之限制。 4. 請計算本身自然橫搖及縱搖之週期。	件，使用數值模擬與水槽造波試驗，證明可以穩定承載儀器，其吃水深度 0.95m 在工作海域之波浪條件下，對於測深之誤差皆在容許範圍之內。甲板上之儀器皆裝設於耐水壓容器內，可使其受到海水潑濺時，亦不影響功能。 3. 依照委員意見辦理。 4. 船舶之起伏自然頻率可用下式估算： $T_{Heave} = 2\pi \sqrt{\frac{V(1 + A'_{33})}{gA_{WP}}}$ $T_{Roll} = 2\pi \sqrt{\frac{BWL^2(k_r^2 + A'_{44})}{gGM_T}}$ $T_{Pitch} = 2\pi \sqrt{\frac{L^2(k_p + A'_{55})}{gGM_l}}$ 上式中 V = 排水； L = 船長； g = 重力加速度； k_r = 橫搖半徑與水線 beam 比； k_p = 縱搖半徑與船長比； A_{WP} = 水線面面積； A'_{33} = 起伏流體附加質量與船舶質量比；

審查人員及意見	合作研究單位處理情形
	A'_{44} = 橫搖流體附加慣性矩與船舶質量與 BWL^2 乘積之比； A'_{55} = 縱搖流體附加質量與船舶質量與 L^2 乘積之比； 使用此三式所計算之起伏、橫搖、縱搖之自然頻率如下： $T_{Heave} = 2\pi \sqrt{\frac{0.49(1+0.7)}{9.8*0.749}} \approx 2.12 \text{ se}$ ； $T_{Roll} = 2\pi \sqrt{\frac{1.073^2(0.46^2 + 0.2)}{9.8*0.292}} \approx 2.1$ ； 以及 $T_{Pitch} = 2\pi \sqrt{\frac{2.75^2(0.28^2 + 0.06)}{9.8*0.694}} \approx 2$ 自然週期之估算與運動模擬與造波機水槽實驗之結果相符。
何良勝 科長： 1. 請依本所出版品規定，辦理報告修正稿。 2. 請補充說明結論部份。 3. 於 2.3 節之耐海性能預估分析中，建議於後續工作中，應考慮增加波浪條件(如週期 3~6 秒，似有不足或不同水深時)，以符合實際情況。 4. 於 2.4 節運動控制中，建議增列試驗波浪條件對於實際情況之數據。 5. 比較圖 2.14 與圖 2.15、圖 2.16 與圖 2.17、圖 2.18 與圖 2.19	1. 依照委員意見辦理。 2. 依照委員意見辦理，結論中加入未來研究之方向建議。 3. 依照委員意見辦理。 4. 依照委員意見辦理，已加入實驗與模擬之比較數據。

審查人員及意見	合作研究單位處理情形
等結果，頂浪和側浪作用下之結果，似無規劃性，此為何種原因？	5. 圖 2.14 與圖 2.15、圖 2.16 與圖 2.17、圖 2.18 與圖 2.19 顯示，在同樣波浪高度與週期之下，本船頂浪之運動與側浪下運動之比較。實驗數據說明起伏、橫搖、縱搖等運動在週期為 3 秒時，頂浪及側浪之運動皆為最大，此結果與模擬及公式推算所得之起伏、橫搖、縱搖自然週期一致。而橫搖、起伏運動受側浪影響，比頂浪時大。

附錄三 期中簡報資料

智慧型太陽能遙控近岸測量船之研究(2/4)

郭振華
台灣大學工程科學及海洋工程系

目的

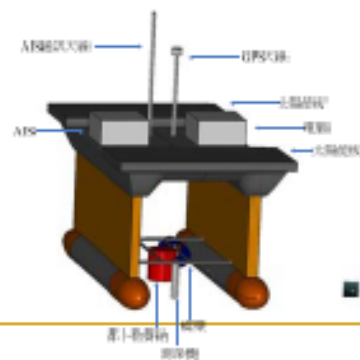
- 建立太陽能驅動之智慧型無人船舶，研發近岸海洋資料蒐集、測量、資料傳送與輔助救難之自動控制船舶相關技術。

報告大綱

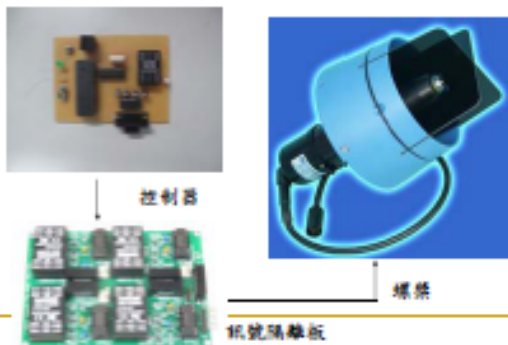
- 無人船舶遙控系統
- 太陽能電力與無人船舶探測能力



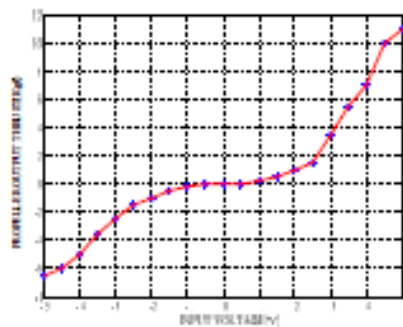
無人船外形及硬體配置



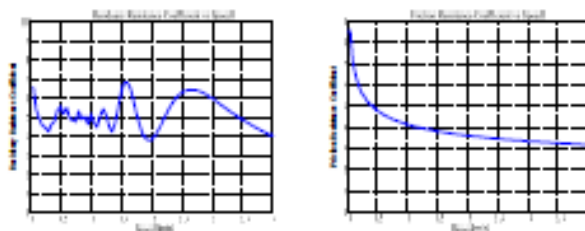
推進器控制器製作



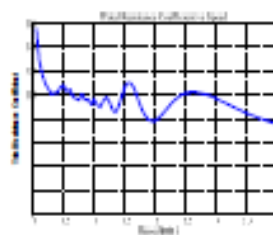
推進器推力與電壓關係



剩餘阻力與摩擦阻力係數圖



總阻力係數圖

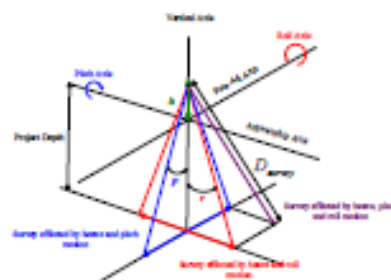


- 取得一最小阻力情況下之速度作為無人船之航行速度。
- 在速度0.75 m/s時有一阻力較小值，故選用此速度作為無人船之航行速度。

耐海性能預估

- 使用Seakeeper軟體進行無人船之起伏、橫搖及縱搖的運動性能估算。其中波浪的資訊參考臺灣技術研究中心對中部海域的波浪統計數據，同時假設船體在0.75 m/s的速度下行駛。
- 船體起伏、縱搖、橫搖運動，在同一波高之情況下週期越大則運動幅度越小，而在同一週期之情況下波高越高則運動幅度越大。
- 在利用測深機探測水深時，船體之起伏、縱搖與橫搖運動皆會影響測深結果，因此必須限制無人船作業的海況條件。
- 水深量測的準確度限制在95%，若船體的運動導致量測結果小於95%的準確度，則此海況條件將不適宜無人船作業。

船體起伏、縱搖與橫搖導致測深結果的誤差

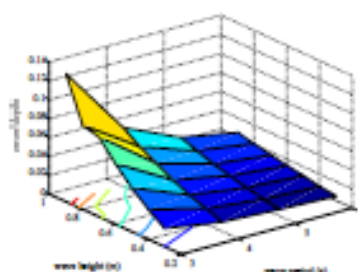


$$D_{survey} = \sqrt{(D+h)^2 + [(D+h) \times \tan(p)]^2 + [(D+h) \times \tan(r)]^2}$$

台灣中西部海域波浪特性

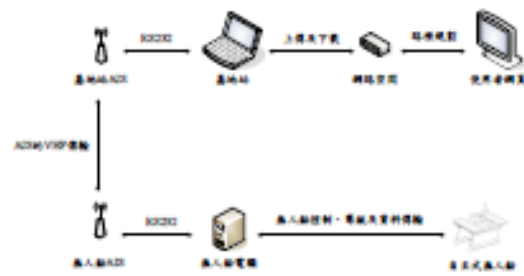
測站	時間(分)	測深(公尺)	波浪特性
第一測站	10:00	10:00	波浪高度平均為 0.75 m，週期為 3.5 s，波高為 0.5 m，波長為 10 m，波速為 3.5 m/s。
第二測站	10:05	10:05	波浪高度平均為 0.75 m，週期為 3.5 s，波高為 0.5 m，波長為 10 m，波速為 3.5 m/s。
第三測站	10:10	10:10	波浪高度平均為 0.75 m，週期為 3.5 s，波高為 0.5 m，波長為 10 m，波速為 3.5 m/s。
第四測站	10:15	10:15	波浪高度平均為 0.75 m，週期為 3.5 s，波高為 0.5 m，波長為 10 m，波速為 3.5 m/s。
第五測站	10:20	10:20	波浪高度平均為 0.75 m，週期為 3.5 s，波高為 0.5 m，波長為 10 m，波速為 3.5 m/s。
第六測站	10:25	10:25	波浪高度平均為 0.75 m，週期為 3.5 s，波高為 0.5 m，波長為 10 m，波速為 3.5 m/s。
第七測站	10:30	10:30	波浪高度平均為 0.75 m，週期為 3.5 s，波高為 0.5 m，波長為 10 m，波速為 3.5 m/s。
第八測站	10:35	10:35	波浪高度平均為 0.75 m，週期為 3.5 s，波高為 0.5 m，波長為 10 m，波速為 3.5 m/s。
第九測站	10:40	10:40	波浪高度平均為 0.75 m，週期為 3.5 s，波高為 0.5 m，波長為 10 m，波速為 3.5 m/s。
第十測站	10:45	10:45	波浪高度平均為 0.75 m，週期為 3.5 s，波高為 0.5 m，波長為 10 m，波速為 3.5 m/s。

水深15公尺船體運動導致測深誤差與水深比與波浪週期、波高之關係



在夏季中，當波浪平均週期大於 4.0s，波高小於 0.7m時為作業範圍。

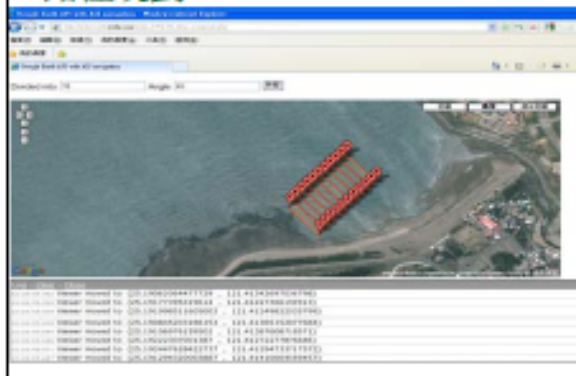
無人船遙控系統架構



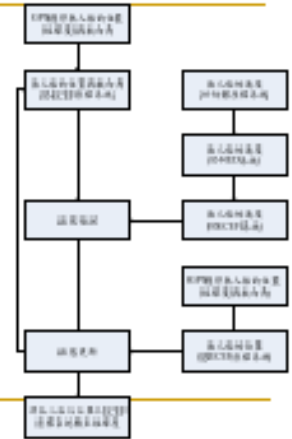
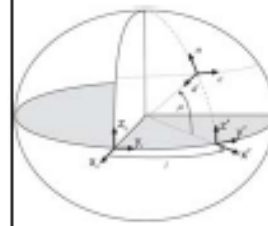
使用者網頁



路徑規劃



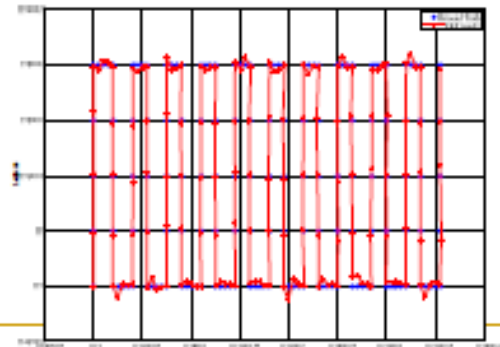
座標轉換與定位



延伸型卡爾曼濾波器定位演算法

$$\begin{aligned}
 &1. \quad \hat{x}_{k|k-1} = \hat{x}_{k-1|k-1} + \hat{A}_{k-1}(\hat{x}_{k-1|k-1} - \hat{x}_{k-1|k-1}) \\
 &2. \quad \hat{y}_{k|k-1} = \hat{C}_k \hat{x}_{k|k-1} \\
 &3. \quad \hat{y}_k = y_k - \hat{y}_{k|k-1} \\
 &4. \quad \hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + \hat{K}_k \hat{y}_k \\
 &5. \quad \hat{K}_k = \frac{\hat{P}_{k|k-1} \hat{C}_k^T}{\hat{P}_{k|k-1} \hat{C}_k^T \hat{C}_k + R_k} \\
 &6. \quad \hat{P}_{k|k} = \hat{P}_{k|k-1} - \hat{K}_k \hat{P}_{k|k-1} \hat{C}_k^T \\
 &7. \quad \hat{P}_{k|k} = \hat{P}_{k|k} + \hat{Q}_k \\
 &8. \quad \hat{x}_k = \hat{x}_{k|k} \\
 &9. \quad \hat{P}_k = \hat{P}_{k|k} \\
 &10. \quad \text{Return } \hat{x}_k, \hat{P}_k
 \end{aligned}$$

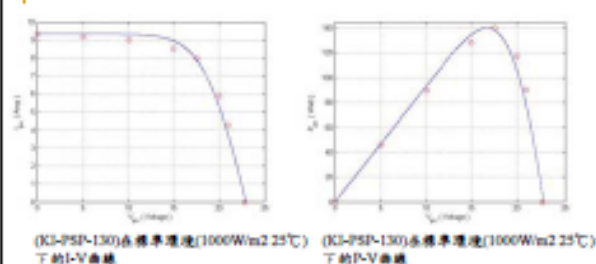
定位模擬



無人船舶太陽能電力系統與探測能力

1. 太陽能發電系統組件特性
2. 太陽能發電系統模擬
3. 載具電力與探測能力之探討

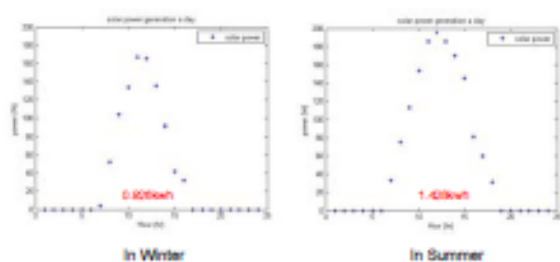
19



紅色圓點為廠商所提供在標準環境的情況下之參數；用以確認模擬模式及數據是否正確。

20

ASC太陽能發電系統可得之電量情況



21

載具電力與探測能力

1. 探測的面積
2. 探測的解析度
3. 探測的時間

$$L \approx \frac{A}{2\lambda} - 2\lambda \approx \frac{A}{2\lambda}$$

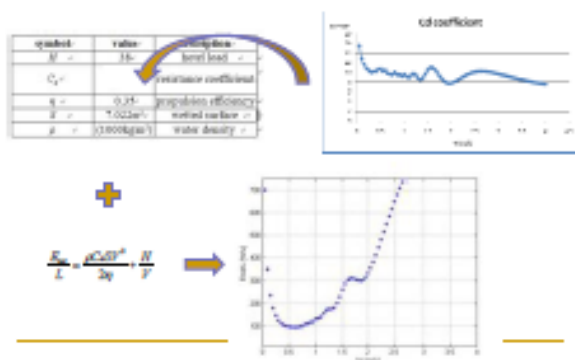
$$V = \frac{L}{\tau} \approx \frac{A}{2\lambda\tau}$$

$$E_{\text{tot}} = \left[\frac{\rho C_d S V^3}{2\eta} + H \right] \tau$$

A : 探測面積
 τ : 探測時間
 λ : 探測解析度
 E_{tot} : 載具總共消耗的電量
 H : 載具維持正常運作所需電量
 C_d : 阻力係數
 η : 推進器的推進效率
 S : 載具的浸水面積
 ρ : 水的密度

22

單位長度下無人船所消耗之電量變化



23

考慮水流速度的影響,先將平均船速V0拆開成V1、V2(順流與逆流)

$$V_1 = \frac{L}{2\tau_1} \quad V_2 = \frac{L}{2\tau_2} \Rightarrow \tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{L}{2V_1} + \frac{L}{2V_2} = \frac{L(V_1 + V_2)}{2V_1 V_2}$$

$$V_0 = \frac{L}{\tau} = \frac{2V_1 V_2}{V_1 + V_2} \Rightarrow 2V_1 V_2 = V_0(V_1 + V_2) \Rightarrow 2V_1 V_2 - V_0 V_1 - V_0 V_2 = 0$$

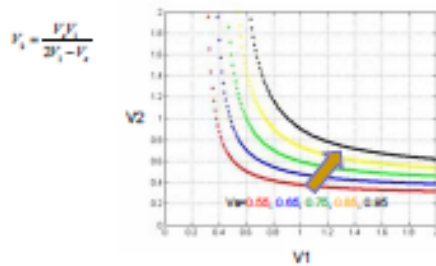
$$E_{\text{tot}} = \left[\frac{\rho C_d S V^3}{2\eta} + H \right] \tau$$

$$E_{\text{tot}} = \left[\frac{\rho C_d S V_1^3}{2\eta} + H \right] \tau_1 + \left[\frac{\rho C_d S V_2^3}{2\eta} + H \right] \tau_2$$

$$\frac{E_{\text{tot}}}{L} = \left[\frac{\rho C_d S V_1^3}{2\eta} + H \right] \frac{1}{2V_1} + \left[\frac{\rho C_d S V_2^3}{2\eta} + H \right] \frac{1}{2V_2}$$

24

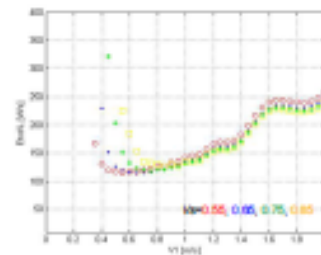
在已知平均船速 V_0 的情況下, V_1 與 V_2 的關係



26

利用上頁之 V_1 與 V_2 關係, 考慮對消耗電量的影響

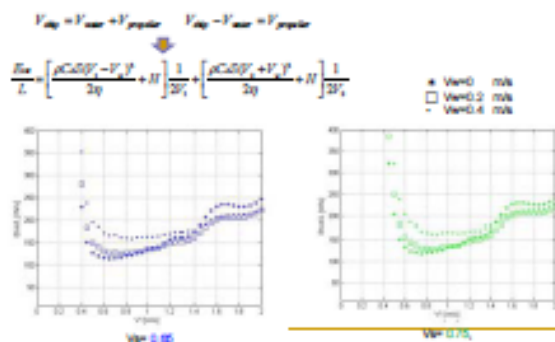
$$\frac{E_{\text{ave}}}{L} = \left[\frac{\rho C_d S V_1^3}{2\eta} + H \right] \frac{1}{2V_1} + \left[\frac{\rho C_d S V_2^3}{2\eta} + H \right] \frac{1}{2V_2}$$



在已知平均船速為 V_0 的情況下, V_1 以及 V_2 會趨近 V_0 才能得到最小消耗電量。

27

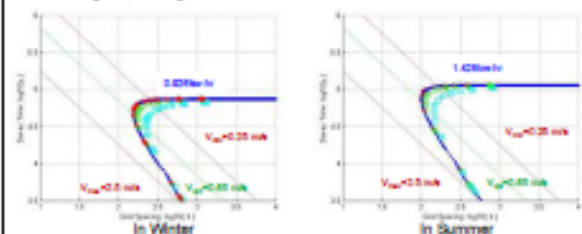
考慮水流速度 $V_w=0.2, 0.4 \text{ m/s}$ 的影響



27

太陽能一天發電量所能達到之探測距離與探測時間之比較

$$E_{\text{ave}} = \left[\frac{\rho C_d S V^3}{2\eta} + H \right] L$$



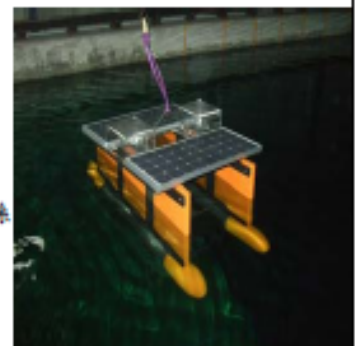
28

結論

- 本計畫之研究目標為設計、製作與測試一具自主式無人工作小船, 利用太陽能與充電電池驅動, 建立其導航定位與路徑追蹤自動控制系統。此工作船可攜帶多種量測儀器, 自動施行港口之水深、水流剖面、地形等測量工作, 且可將資料藉由無線電波傳遞至岸上之監控電腦。無人船之監控與通信採用船舶自動識別系統, 因此本研究之成果在未來可以進一步延伸為架構在無線網路上之無人船隊系統, 藉由無人船隻間之相互通訊, 可以施行大規模的海岸測量與監控。
- 本報告說明無人船之設計、推進器模式、遙控介面設計、太陽能電力與無人船海域探測能力之規劃。

年度預期成果

- 完成無人船遙控系統
- 完成初步海測
- 探討無人船電力與測量誤差之關係



附錄四 期末簡報資料

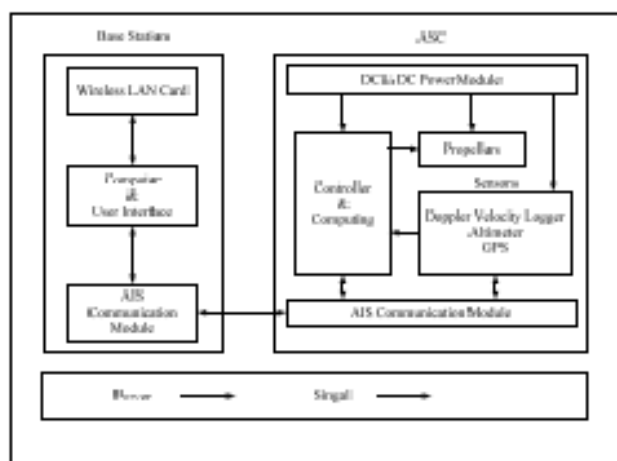
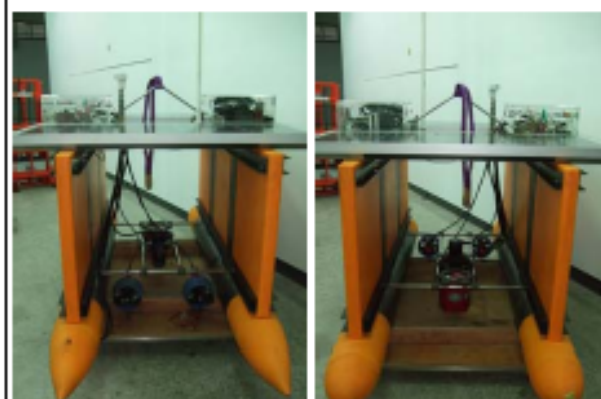
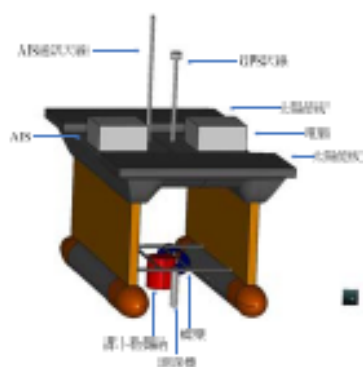
智慧型太陽能遙控近岸測量船 之研究(2/4)期末報告

郭振華
台灣大學工程科學及海洋工程系

目的

- 建立太陽能驅動之智慧型無人船舶，研發近岸海洋資料蒐集、測量、資料傳送與輔助救難之自動控制船舶相關技術。

無人船外形及硬體配置



電器酬載

- A. Permanent load (Hotel Load)



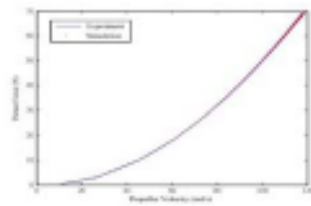
Hotel Load: $15+3+3+24=45W$

螺旋槳載

B. Variable load

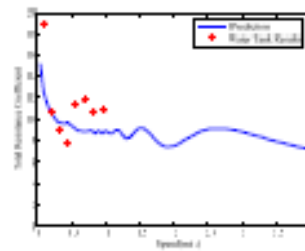


The Driver of the ABC (Model 1030)



$$\eta_{\text{propeller}} = \frac{R_{\text{prop}} - V_{\text{tip}}}{P_{\text{propeller}}} = \frac{R_{\text{prop}} - V_{\text{tip}}}{P_{\text{propeller}} - P_{\text{tip}}} = \frac{16.88(N) - 0.55(m/s)}{60(W) - 50(W)} = 0.209$$

總阻力係數圖



在速度0.4 m/s時有一阻力較小值，故選用此速度作為無人船之航行速度。

載具電力與探测能力

• 太陽能載具的電力消耗主要有：

1. 探测的面積
2. 探测的解析度
3. 探测的時間

$$L \approx \frac{A}{2\lambda} - 2\lambda \approx \frac{A}{2\lambda}$$

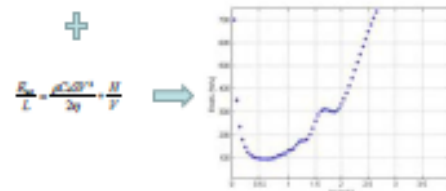
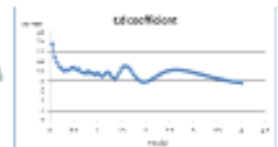
$$V = \frac{L}{\tau} \approx \frac{A}{2\lambda\tau}$$

$$E_{\text{tot}} = \left[\frac{\rho C_d S V^3}{2\eta} + H \right] \tau$$

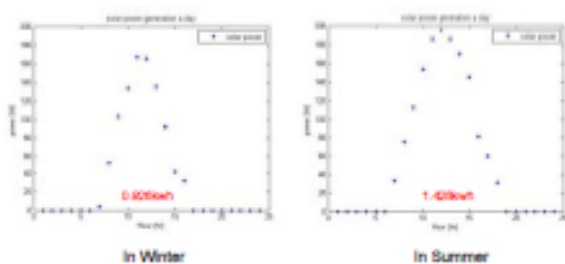
A : 探测面積
 τ : 探测時間
 λ : 探测解析度
 E_{tot} : 載具總共消耗的電量
 H : 載具維持正常運作所需電量
 C_d : 阻力係數
 η : 推進器的推進效率
 S : 載具的浸水面積
 ρ : 水的密度

單位路徑消耗之電量

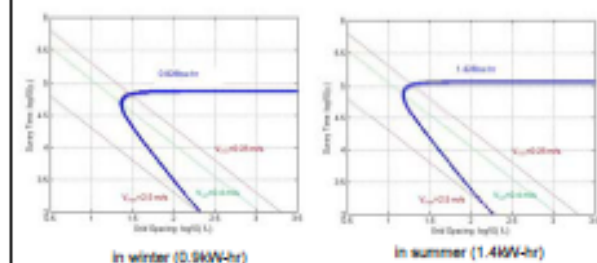
symbol	value	description
A	21	area load
Cd	0.9	resistance coefficient
S	0.01 m ²	area of water
S	17.25 m ²	area of water
ρ	1000 kg/m ³	density of water



太陽能發電之電量



能量、路徑間距及測量時間

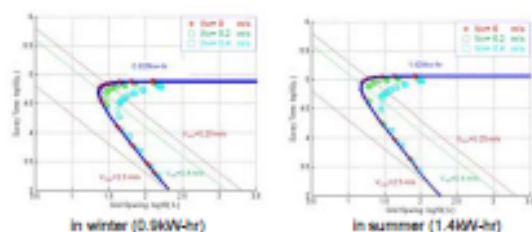


水流中的速度規劃

	V1(m/s)	V2(m/s)	Temp. (°C)
Exp03_Vexp0	0.3	0.3	175.85
Exp03_Vexp0.2	0.4	0.24	200.95
Exp03_Vexp0.4	0.4	0.24	313.45
Exp04_Vexp0	0.4	0.4	157.56
Exp04_Vexp0.2	0.3	0.25	184.29
Exp04_Vexp0.4	0.65	0.29	278.21
Exp05_Vexp0	0.3	0.3	159.12
Exp05_Vexp0.2	0.65	0.41	185.35
Exp05_Vexp0.4	0.7	0.39	272.79

水流對觀測的影響

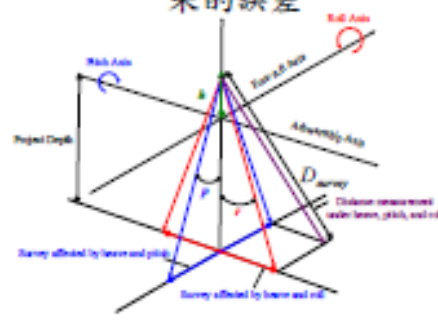
$$R_{ex} = \left[\frac{\rho C_D \partial V_x^2}{2\sigma} - V_x^2 \right] \tau_x + \left[\frac{\rho C_D \partial V_y^2}{2\sigma} + V_y^2 \right] \tau_y$$



耐海性能預估

- 使用Seakeeper軟體進行無人船的起伏、橫搖及縱搖的運動性能估算，其中波浪的資訊參考臺灣技術研究中心對中部海域的海象統計數據，同時假設船體在0.4 m/s的速度下行駛。
- 船體起伏、縱搖、橫搖運動，在同一波高的情況下週期越大則運動幅度越小，而在同一週期的情況下波高越高則運動幅度越大。
- 在利用測深機探測水深時，船體的起伏、縱搖與橫搖運動皆會影響測深結果，因此必須限制無人船作業的海況條件。

船體起伏、縱搖與橫搖導致測深結果的誤差

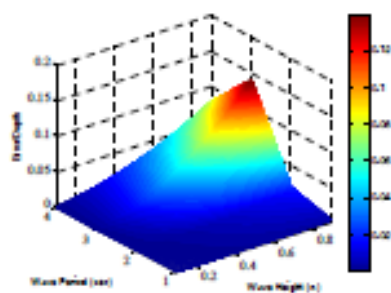


$$D_{survey} = \sqrt{(D+h)^2 + [(D+h) \times \tan(p)]^2 + [(D+h) \times \tan(r)]^2}$$

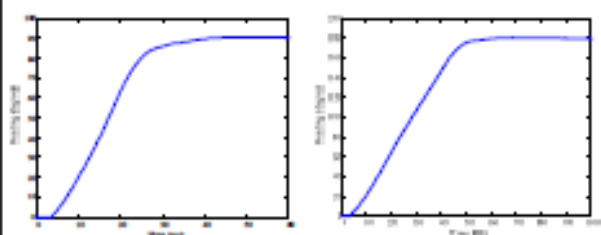
台灣中部海域波浪特性

項目	時間(小時)	地點	波浪特性
中央氣象局	1975-1976	基隆	基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析。
基隆港	1975-1976	基隆	基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析。
基隆港	1975-1976	基隆	基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析。
基隆港	1975-1976	基隆	基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析。
基隆港	1975-1976	基隆	基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析。
基隆港	1975-1976	基隆	基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析。
基隆港	1975-1976	基隆	基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析。
基隆港	1975-1976	基隆	基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析。
基隆港	1975-1976	基隆	基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析，基隆港內波浪特性分析。

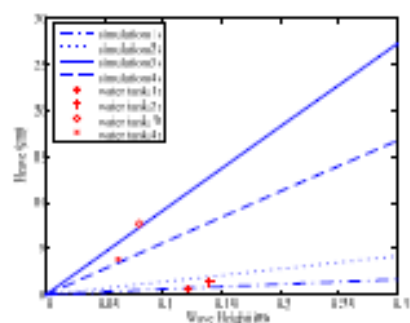
水深15公尺船體運動導致測深誤差與水深比與波浪週期、波高之關係



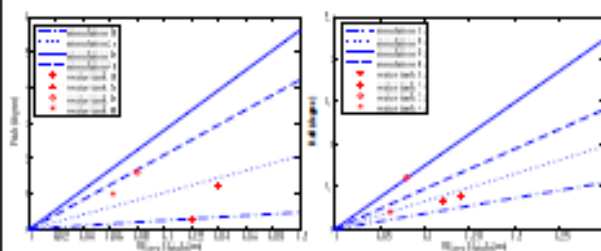
方向控制



波浪中起伏運動



波浪中橫搖、縱搖運動



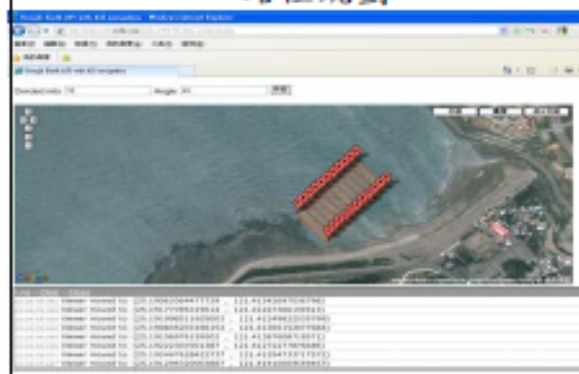
遙控系統



使用者網頁



路徑規劃



[illegible]

```

    graph TD
      1[1.  $\hat{x}_k = \begin{bmatrix} x_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$   
 $\hat{y}_k = \begin{bmatrix} y_k \cos(\theta_k) \cos(\phi_k) + z_k \sin(\theta_k) \cos(\phi_k) \\ y_k \sin(\theta_k) \cos(\phi_k) + z_k \sin(\theta_k) \sin(\phi_k) \\ y_k \sin(\theta_k) \sin(\phi_k) + z_k \cos(\theta_k) \end{bmatrix}$ ] --> 2[2.  $\begin{bmatrix} \hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + \cos(\theta_k) \cos(\phi_k) \Delta t \\ \hat{y}_{k+1} = \hat{y}_k + \sin(\theta_k) \cos(\phi_k) \Delta t \\ \hat{z}_{k+1} = \hat{z}_k + \sin(\theta_k) \sin(\phi_k) \Delta t \end{bmatrix}$   
 $\hat{y}_{k+1} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{k+1} \cos(\theta_{k+1}) \cos(\phi_{k+1}) + \hat{z}_{k+1} \sin(\theta_{k+1}) \cos(\phi_{k+1}) \\ \hat{y}_{k+1} \sin(\theta_{k+1}) \cos(\phi_{k+1}) + \hat{z}_{k+1} \sin(\theta_{k+1}) \sin(\phi_{k+1}) \\ \hat{y}_{k+1} \sin(\theta_{k+1}) \sin(\phi_{k+1}) + \hat{z}_{k+1} \cos(\theta_{k+1}) \end{bmatrix}$ ]
      2 --> 3[3.  $\hat{x}_k = \hat{x}_k, \hat{y}_k^T = \hat{y}_k^T$ ]
      3 --> 4[4.  $\hat{y}_k = \begin{bmatrix} \hat{y}_k \cos(\theta_k) \cos(\phi_k) \\ \hat{y}_k \sin(\theta_k) \cos(\phi_k) \\ \hat{y}_k \sin(\theta_k) \sin(\phi_k) \end{bmatrix}$ ]
      4 --> 5[5.  $\hat{y}_k = \begin{bmatrix} \hat{y}_k \cos(\theta_k) \cos(\phi_k) \\ \hat{y}_k \sin(\theta_k) \cos(\phi_k) \\ \hat{y}_k \sin(\theta_k) \sin(\phi_k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ ]
      5 --> 6[6.  $\hat{y}_k = \begin{bmatrix} \hat{y}_k \cos(\theta_k) \cos(\phi_k) \\ \hat{y}_k \sin(\theta_k) \cos(\phi_k) \\ \hat{y}_k \sin(\theta_k) \sin(\phi_k) \end{bmatrix}$ ]
      6 --> 7[7.  $\hat{y}_k = \hat{y}_k \cos(\theta_k) \cos(\phi_k) + \hat{z}_k \sin(\theta_k) \cos(\phi_k)$ ]
      7 --> 8[8.  $\hat{y}_k = \hat{y}_k \cos(\theta_k) \cos(\phi_k) + \hat{z}_k \sin(\theta_k) \cos(\phi_k)$ ]
      8 --> 9[9.  $\hat{y}_k = \hat{y}_k \cos(\theta_k) \cos(\phi_k) + \hat{z}_k \sin(\theta_k) \cos(\phi_k)$ ]
      9 --> 10[10. Return  $\hat{x}_k, \hat{y}_k$ ]
  
```

測試影片

順流路徑定位

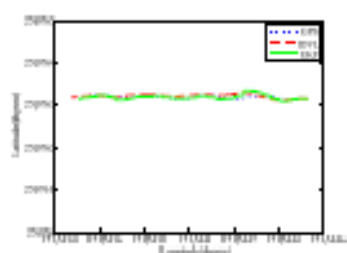
順流路徑之速度與方向

The figure consists of two side-by-side line graphs. The left graph plots velocity in m/s on the y-axis (ranging from 0.0 to 0.8) against time in seconds on the x-axis (ranging from 0 to 400). The data shows a highly fluctuating signal, mostly between 0.2 and 0.6 m/s, with a peak near 0.7 m/s around 150 seconds. The right graph plots direction in degrees on the y-axis (ranging from -20 to 20) against time in seconds on the x-axis (ranging from 0 to 400). The data shows a relatively stable signal, fluctuating slightly around 0 degrees.

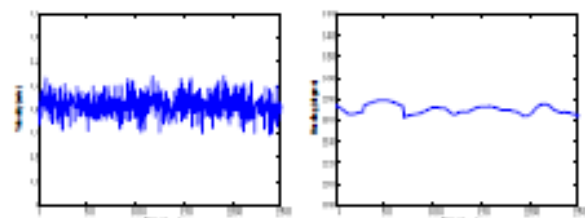
順流路徑控制之橫搖、縱搖與起伏

The figure consists of three vertically stacked plots sharing a common x-axis labeled 'Time (sec)' ranging from 0 to 250. The top plot shows 'Roll (deg)' fluctuating around 0. The middle plot shows 'Yaw (deg)' which is 0 until 100 seconds, then steps up to approximately 10 degrees. The bottom plot shows 'Heave (m)' with high-frequency oscillations around 0.5m.

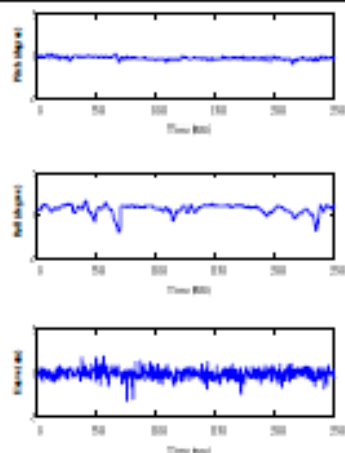
逆流路徑定位



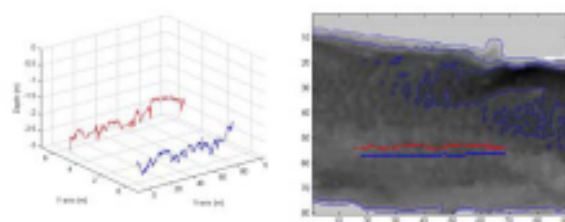
逆流路徑之速度與方向



逆流路徑控制之橫搖、縱搖與起伏



水深量測



水深量測值

	1	2	3	4	5	6	7
1	2.50	2.57	2.55	2.48	2.58	2.48	2.63
2	2.54	2.60	2.60	2.56	2.68	2.48	2.56

	8	9	10	11	12	13	14
1	2.75	2.5	2.58	2.59	2.45	2.70	2.4
2	2.26	2.41	2.4	2.60	2.48	2.7	2.45

	15	16	17	18	19	20	21
1	2.50	2.43	2.46	2.46	2.58	2.52	2.17
2	2.5	2.51	2.55	2.44	2.45	2.70	2.52

	22	23	24	25
1	2.55	2.52	2.56	2.56
2	2.45	2.45	2.56	2.55

已知水深與量測值誤差

	1	2	3	4	5	6	7
1	2.50	2.44	2.48	2.58	2.48	2.74	2.67
2	1.45	2.05	2.44	2.41	2.46	2.05	2.40

	8	9	10	11	12	13	14
1	2.4	2.58	2.54	2.51	2.48	2.55	2.59
2	1.15	2.59	2.52	2.49	2.41	2.56	2.27

	15	16	17	18	19	20	21
1	2.55	2.55	2.52	2.55	2.47	2.52	2.56
2	2.55	2.55	2.52	2.59	2.52	2.55	2.55

	22	23	24	25
1	2.55	2.58	2.58	2.42
2	2.56	2.55	2.55	2.55

$$e_{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^n [\text{exp_map}(x_i) - \text{ground_truth}(x_i)]}{\sum_{i=1}^n [\text{exp_map}(x_i) + \text{ground_truth}(x_i)]} = \frac{4.9913}{617.2097} = 0.0081$$

結論

- 本計畫之研究目標為設計、製作與測試一具自主式無人工作小船，利用太陽能與充電電池驅動，建立其導航定位與路徑追蹤自動控制系統。此工作船可攜帶多種量測儀器，自動施行港口之水深、水流剖面等測量工作，且可將資料藉由無線電波傳送至岸上之監控電腦。無人船舶之監控與通信採用船舶自動識別系統，因此本研究之成果在未來可以進一步延伸為架構在無線網路上之無人船隊系統，藉由無人船隻間之相互通訊，可以施行大規模的海岸測量與監控。
- 本報告說明無人船舶之設計、遙控介面設計、太陽能電力與無人船海域探測能力之規劃。