

95-61-7199
MOTC-IOT-94-H2DB009

水下結構物自動檢測系統研究 (1/4)



交通部運輸研究所
中華民國 95 年 4 月

95-61-7199
MOTC-IOT-94-H2DB009

水下結構物自動檢測系統研究 (1/4)

著者：邱永芳、郭振華、邱逢琛、蔡金吉

交通部運輸研究所
中華民國 95 年 4 月

GPN : 1009500920

定價 100 元

國家圖書館出版品預行編目資料

水下結構物自動檢測系統研究. (1/4) / 邱永芳
等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所,
民95

面 ; 公分

ISBN 986-00-4952-1(平裝)

1. 水下工程 - 自動化 2. 機械人

443.029

95006963

水下結構物自動檢測系統研究 (1/4)

著 者：邱永芳、郭振華、邱逢琛、蔡金吉

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版 > 中心出版品)

電 話：(04)26587176

出版年月：中華民國 95 年 4 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 110 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定 價：100 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書坊臺視總店：臺北市八德路 3 段 10 號 B1•電話：(02)25781515

五南文化廣場：臺中市中山路 2 號 B1•電話：(04)22260330

GPN：1009500920

ISBN：986-00-4952-1(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份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

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：水下結構物自動檢測系統研究 (1/4)			
國際標準書號 (或叢刊號) ISBN 986-00-4952-1 (平裝)	政府出版品統一編號 1009500920	運輸研究所出版品編號 95-61-7199	計畫編號 94-H2DB009
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳主任 計畫主持人：邱永芳主任 研究人員：蔡金吉、張富東 聯絡電話：04-26587221 傳真號碼：04-26571329	合作研究單位：國立臺灣大學 計畫主持人：郭振華副教授 研究人員：邱逢琛、林中一、陳紀均 地址：臺北市羅斯福路 4 段 1 號 聯絡電話：02-33665739		研究期間 自 94 年 02 月 至 94 年 11 月
關鍵詞：水下機器人、港灣檢測、自動化			
摘要： 本計畫之目標為建立港灣構造物檢測維護與水下作業之機器人系統，以及研發水下作業自動化系統技術。 本計畫將研究具備下列功能之水下機器人系統： 1. 具有洋流中動態定位的能力。 2. 具有自動導航及位置、姿態控制的功能。 3. 具有高解析度以及影像資料蒐集能力。 4. 可彈性配掛不同的探測儀器，以支援不同的任務。 5. 具有大範圍及長時間在水下工作的能力。 6. 操作人員可以藉由人機介面直接控制機器人系統的運動。 根據上述目標，本計畫擬研究下列必要課題： 1. 港灣檢測與工之水下機器人系統之規劃。 2. 機構設計及控制系統設計之研究。 3. 人機介面及監控系統設計之研究。 4. 水下機器人動態定位系統設計之研究。 5. 水下機器人系統之測試與評估。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
95 年 4 月	98	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工本費價購。
機密等： ☐ 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: Robotic System for Underwater Structure Inspection (1/4)			
ISBN(OR ISSN) ISBN 986-00-4952-1 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009500920	IOT SERIAL NUMBER 95-61-7199	PROJECT NUMBER 94-H2DB009
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu, Yuang-Fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chiu, Yuang-Fang PROJECT STAFF: Tsai, Chin-Chi; Chang, Fu-Tung PHONE: +886-4-26587221 FAX: +886-4-26571329			PROJECT PERIOD FROM February 2005 TO November 2005
RESEARCH AGENCY: NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY PRINCIPAL INVESTIGATOR: Guo, Jen-Hwa PROJECT STAFF: Chiu, Forng-Chen; Lin, Chung-Yi; Chen, Chi-Chung ADDRESS: No.1, Sec. 4, Roosevelt Road, Taipei 106, Taiwan, R.O.C. PHONE: +886-2-33665739			
KEY WORDS: Underwater robotics, Harbor inspection, Automation			
ABSTRACT The goal of research is to study the system design of an underwater robot for the inspection of underwater structures. The technical requirements for the design and the operational procedure of this underwater robot will be investigated. Moreover, we will study the underwater robotic system that has the following functions: 1. Dynamic positioning in water currents. 2. Automatic navigation and control of its own position and posture. 3. Imaging of underwater structure using on board sensors. 4. Flexibility in choosing payload equipments. 5. Ability to work long-range and long-time. 6. Interface is friendly to the operator. The approach and research topics corresponding to the above objectives are as following: 1. Design issues of the underwater robotic system. 2. Design issues of the control system. 3. Design issues of the man-machine interfaces. 4. Design issues for the navigation system. 5. System integration and evaluation. The analysis and design methodology developed for this project will lead to deeper understanding of robotics systems that are efficient for harbor structure inspection. The advantages are safer and less expensive and more effective than divers to do the harbor's inspection tasks.			
DATE OF PUBLICATION April 2006	NUMBER OF PAGES 98	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	VI
第一章 緒論	1-1
1.1 研究範圍與對象	1-3
1.2 研究內容與工作項目	1-3
1.3 第一年期之研究課題	1-4
第二章 系統規劃	2-1
2.1 系統設計	2-1
2.2 次系統及元件	2-3
2.2.1 載具本體結構	2-3
2.2.2 感測元件	2-3
2.2.3 導航控制次系統	2-4
2.2.4 人機界面	2-5
2.2.5 支援次系統	2-6
第三章 動力學模型及控制器設計	3-1
3.1 動力學模型	3-1
3.2 運動控制器	3-3
3.2.1 穩定性	3-6
3.2.2 收斂速度	3-10
第四章 運動模擬	4-1
4.1 螺槳推力分配	4-1
4.2 螺槳推力數據	4-2
4.3 系統模擬	4-4
4.3.1 n 函數設計	4-6

4.3.2 路徑追蹤	4-13
4.3.3 有洋流下的控制模擬	4-15
第五章 作業系統規劃	5-1
5.1 載具之初步設計	5-1
5.2 感測器訊號整合	5-1
5.3 水下檢測任務規劃	5-3
第六章 結論與建議	6-1
參考文獻	7-1
附錄一：期中審查意見處理情形表	8-1
附錄二：期末審查意見處理情形表	8-5
附錄三：期中簡報資料	8-9
附錄四：期末簡報資料	8-22

圖目錄

圖 2.1 系統設計概念圖	2-1
圖 3.1 水下載具之座標軸	3-1
圖 3.2 運動控制器方塊圖	3-4
圖 4.1 螺槳尺寸	4-3
圖 4.2 螺槳推力曲線	4-4
圖 4.3 以二次方程式近似螺槳推力與電壓關係	4-4
圖 4.4 載具單一自由度控制器架構	4-5
圖 4.5 n_1 函數(實線為函數曲線, 虛線為螺槳推力數據)	4-7
圖 4.6 n_2 函數(實線為函數曲線, 虛線為螺槳推力數據)	4-7
圖 4.7 n_3 函數(實線為函數曲線, 虛線為螺槳推力數據)	4-8
圖 4.8 n_4 函數(實線為函數曲線, 虛線為螺槳推力數據)	4-8
圖 4.9 不反應區域對深度控制的影響 (n_1 函數)	4-10
圖 4.10 n 函數對深度控制的影響	4-12
圖 4.11 閉迴路角度步階響應	4-14
圖 4.12 閉迴路路徑步階響應	4-14
圖 4.13 洋流造成載具運動	4-16
圖 4.14 深度 1 公尺之水平面橫向追蹤(全長 15m, 分成 15 個目標點)	4-17
圖 5.1 水下載具框架及夾具	5-1
圖 5.2 感測器訊號整合架構	5-3
圖 5.3 環境地圖及觀測路徑	5-4
圖 5.4 拋石觀測任務示意圖	5-5

表目錄

表 2.1 設計規格	2-2
表 2.2 規劃中之影像聲納技術規範	2-4
表 2.3 都卜勒速度聲納之技術規範	2-5
表 2.4 磁力式航向角感測儀 傾斜儀 深度計規格	2-5
表 4.1 螺槳推力數據	4-3
表 4.2 各運動方向之模式參數	4-6
表 4.3 不反應區域之大小對 n_1 函數在深度控制影響	4-9
表 4.4 不同 n 函數在深度控制結果	4-11

第一章 緒 論

由於船舶活動頻繁，常造成港灣設施的損毀。而檢測及施工作業主要依賴有經驗的潛水人員，但由於工作環境危險性高，對於合適的輔助機器，有迫切而實際的需求。水下機器人相關技術在提昇港灣設施水下檢測工作效率、解決目前港灣水下檢測工作所遭遇的困難問題上具充分應用價值。現有水下作業載台可簡要區分為表面船舶、載人潛水船、無人水下載具。其中，無人水下載具又可再區分為水下遙控載具 (Remotely Operated Vehicle; ROV)[1]、水下拖曳載具 (Towed Vehicle)[2,3]、自主式水下載具 (Autonomous Underwater Vehicle; AUV)[4]。在無人水下載具方面，由於海底石油產業之大量需求，ROV 技術因而相當成熟且普遍，低階成品已可自市場購得。臺灣除了臺大、海大及中山等大學科系皆有自國外購入，配備攝影機的所謂 Low Cost ROV 協助觀測工作，中油公司曾租借 ROV 進行油氣探勘工作，海巡署正積極規劃船舶配備 ROV 協助海域巡防工作之外，臺大工科海洋系水下載具研究室曾於近十年先後自力研製水下機器人試驗機，培育相關人才並建立關鍵技術[5,6,7]。

由於 ROV 的活動範圍受纜線之限制，其操作且需依賴純熟的技術人力，造成使用上的不便，近年來，水下機器人技術的研究開發，因應市場的需求以及為了配合學術上的研究，已經朝向更複雜、更嚴苛的作業環境，並以多功能及高度自動化為目標。AUV 的運動由於不受纜線的限制，近年來更拜電子及電腦產業技術發達之賜，逐漸在廣域調查工作上有取代 ROV 的趨勢，是現今水下機器人技術研發的主流。然而 AUV 技術雖在近年已逐漸成熟，但其技術可靠度仍待檢驗，無論是技術或載具的取得，其成本皆遠較一般 ROV 高昂。在港灣水下結構物的觀測、調查方面，尤其是在防波堤等結構物之水下檢測的應用上，AUV 更受限於其推進及定位能力。本計畫擬結合 AUV 及 ROV 的技術優勢，建立一具自主式水下拖曳載具，以纜線來提供電源及通訊，可以使用人為控制的方法在水中定點做徘徊控制。具有流線外型，可以自動控制技術操控其巡航姿態及深度，在港內、低水流、小範圍內之

作業時以 ROV 模式操作，在港外或大範圍作業時則以拖曳載具模式操作。其技術信賴度較高，欲達到實用化的技術門檻較 AUV 低，且可以搭載光學或聲學儀器，以便更近於觀測標的，提昇資料的解析度。在強大水流下也可以長時間作業。因此，針對前述港灣設施水下檢測工作，投入此等自主式水下拖曳載具系統技術的研發，以建立屬於臺灣自主的技術能力應是迫切且極具意義的。本計畫之執行成果可以提供決策者規劃港灣技術研究方向的參考資訊。本研究計畫符合國家科技發展計畫第四大目標：促進國家永續發展，及第四項策略：進行港灣與海洋運輸及相關科技之研究。水下機器人系統，可以提供人類在海下從事長期、大範圍的觀測活動，減輕水下作業之工作負擔，保障生命財產的安全。因此是現今各先進國家所一致努力的研發方向。本計畫所設定的港灣結構物水下檢測作業自動化研究為未來水下機器人系統的主要應用領域之一。

本計畫預期可獲得下列成果：

1. 掌握港灣水下機器人系統之研發能力，建立水下自動化作業技術。
2. 建立港灣構造物之大範圍、即時檢測能力，有助於提昇港灣建造、維護及運作之安全性。
3. 配合現有港灣水下檢測技術，發展風浪流過大，以及防波堤外等不適於潛水人員作業區域之自動化水下作業能力。
4. 本研究完成後預期之績效如下：

水下機器人在海洋科學研究、海洋工程應用等領域為現今各先進國家所一致努力的方向。港灣水下檢測作業的自動化研究為其中的一個重要項目。本研究所將建立自主式水下拖曳載具的模擬、控制、系統設計等核心技術，無論在學術上或技術突破上都相當具挑戰性。本研究將建構可攜帶多種探測儀器之水下機器人系統。其設計理念乃根據港灣水下檢測作業需求，並考慮洋流及低能見度之操作條件，及不同任務下的儀器配掛彈性，為一具備導航及成像能力之自動化水下作

業系統。本研究所建立的核心技術，為後續應用水下機器人於港灣結構物檢測作業自動化之基礎，對於海域航行安全及海下作業效率的提升皆有助益。

1.1 研究範圍與對象

本計畫的範圍為建構適用於港灣構造物檢測、維護、與港灣水下施工的機器人系統，本計畫將建立水下作業用機器人實驗系統，累積系統研究、系統設計的關鍵技術。本計畫研究對象包含水下機器人系統設計規劃及製作、導航控制、影像處理方法、及人機介面之設計等。未來水下機器人在港灣工程之需求可能有下列幾項：

1. 施工：沉泥之探測，基樁碼頭腐蝕防護；風災損害之即時評估；水下焊接、切割等。
2. 測量：船舶、結構物之水下檢測；沉泥中或濁水中之成像技術；堤防、沉箱、基樁等之檢查；斜坡海堤水深量測；水中結構物之觀測；飄沙觀測；廣域水文資料蒐集等。
3. 打撈：水下儀器佈放及回收；遺失儀器之搜尋；海難調查；沉沒物搜尋等。
4. 環保：污染情況之即時量測；環保資料蒐集等。

1.2 研究內容與工作項目

本研究以四年為期，分年工作項目與主要內容如下：

1. 94 年度：系統設計與動力學分析

內容：建立載具的動力學分析與自主式水下拖曳載具系統設計所需關鍵工具。

2. 95 年度：控制方法與模擬驗證、水下機器人本體設計與製作

內容：建立載具深度與姿勢控制的理論方法，並藉由模擬予以驗證。

3. 96 年度：原型設計、整合與水槽測試

內容：包含電纜及酬載儀器在內的全系統原型設計、軟硬體整合與水槽測試。

4. 97 年度計畫(4/4):海域測試與觀測方法之研究

內容：包含電纜及酬載儀器在內的全系統原型設計、軟硬體整合與港灣防波堤堤趾檢視程序之建立。

1.3 第一年期之研究課題

根據前述工作項目與主要內容，本計畫主要研究課題依序如下：

1. 載具系統運動數學模式之建立
2. 載具系統運動模擬計算程式的開發
3. 載具系統動力學分析及其原型的初步設計
4. 載具深度與姿勢控制理論方法之建立
5. 載具深度與姿勢控制之模擬驗證
6. 載具本體設計與製作
7. 包含電纜及酬載儀具在內的全系統原型設計及軟硬體整合
8. 載具原型的全系統測試

本計畫第一年期之主要研究課題包含上述 1~3 項，其執行步驟如下：

步驟 1. 運動數學模式之建立

本研究建構之數學模式包含載具及控制螺槳在內為一整體之載具系統，描述其運動數學模式。本計畫並根據數學模式建立載具之運動控制器，確立控制系統的穩定性。

步驟 2. 系統運動模擬計算程式之撰寫與試算

依循步驟 1 所建構之數學模式，撰寫載具系統運動模擬計算程式並做初步試算與確認。

步驟 3. 載具系統原型的初步設計與性能分析

依據步驟 2 探討的結果，採用適宜之外形尺寸以進行系統原型的初步設計，並進行外殼、支架之製作組裝。

第二章 系統規劃

2.1 系統設計

本計畫設計之水下遙控載具，其組成之元件及次系統包含：

1. 載具本體結構(支架、浮力材、機械轉盤、螺槳、控制筒)；
2. 感測元件(都卜勒、光學攝影機)；
3. 導航控制電腦；
4. 人機界面；
5. 支援次系統(纜線、交流轉直流電源供應器、纜線車架)；

載具以 100 公尺之纜線與操作者界面相連，操作者可以自動控制或以手動方式操縱載具。載具經由 4 具螺槳之控制，可實現縱向、垂向、橫向、及水平面之轉向運動。行進速度及深度可選擇為手動控制或自動控制。載具之導航資訊，例如時間、方位、深度、機械轉盤位置、螺槳轉速、載具速度等皆即時顯示於人機界面之監視螢幕。其系統設計概念如圖 2.1 所示。設計規格如表 2.1 所示。

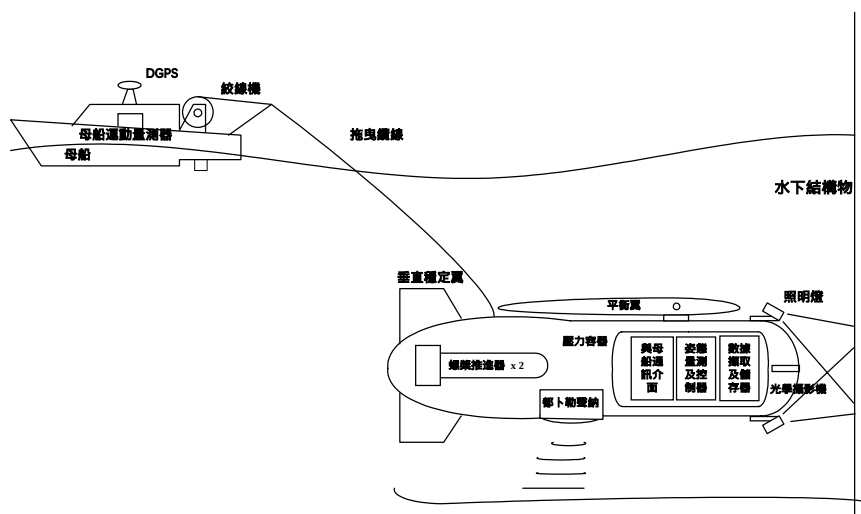


圖 2.1 系統設計概念

表 2.1 設計規格

項目	規格
外型尺寸	0.9m(L)× 0.6m(W)× 0.6m(H)
重量	40kg 空氣中重量
操作深度	100 m
航速	最大 0.8 m/s
配重	3 kg (可調整)
推進器	4× 1 hp
電動機械轉盤	1 個
感測元件	視訊攝影機; 影像聲納
導航元件	都卜勒聲納
支援系統	電源：110VAC, 50/60 Hz, 10 Amps ：220VAC, 50/60 Hz, 20 Amps 交直流電源供應器；1 個 運輸：小型工作船或吊車

2.2 次系統及元件

2.2.1 載具本體結構

載具的結構可分為耐壓結構部、非耐壓結構部、浮力材三部分。耐壓結構部為承載電子儀器之耐壓容器。耐壓殼的形狀是考慮對抗外壓負荷的結構效率以及佈置上的要求而決定，基本上是以圓筒形狀在製造及拆裝為最方便。非耐壓結構部，主要為開框架結構。開框架結構是利用不鏽鋼管材組合而成的骨架，以達到輕量及耐腐蝕性，並可於其內部固定耐壓結構部、感測元件、螺槳推進器以及其他裝備機具，並於其上部附加浮力材。此方式有較易纏繞到外部障礙物及流體阻力較大等缺點，但其優點則是較容易追加設備及調整浮力、容易維修、水下運動較安定等。為使載具在水中能夠達到浮力與重力平衡的運動狀態，我們必須加上浮力材及配重鉛塊來平衡重力與耐壓結構部所產生浮力的差量。浮力材必須重量小而浮力大，合成發泡材是理想的浮力材材料。綜合以上敘述考量，載具本體的架構包含電源轉換及控制電腦圓筒、儀器支架、外框、配重鉛塊等。外框及儀器支架採用模組式設計，以便於製作及安裝。儀器可輕易配掛於支架之適當位置，其配掛位置也可視需求做調整。

2.2.2 感測元件

載具以其配掛之電子式掃描聲納探頭為感測元件，以聲波所生成之影像檢視水下物體外觀。表 2.2 所示為規劃的聲納規格。聲納可提供目標物之反射強度及聲音回傳時間等訊號，經由電腦之通訊界面接收而做即時之影像處理，所重組之岸壁影像並顯示於監視器上，以供人員判讀。載具另配掛一具視訊攝影機，配合兩只鹵素燈泡照明，可以在近距離時觀測水下物體，利用影像擷取的方法，拼湊出一完整的觀測圖形。

表 2.2 規劃中之影像聲納技術規範

頻率	675kHz
聲束角度	10 degrees
距離	150 meters max.
角度	0 to 180 degrees
解析度	4,8,14bits
重量	1.5 kg in water
功率	22-48DC @1Amp

2.2.3 導航控制次系統

載具系統必須有精確的導航及運動控制，與影像聲納、視訊攝影機配合，方能配合載具之光學攝影機擷取正確之環境影像，而導航資料亦為組合不同觀測點資料，以形成大範圍影像之依據。本計畫規劃之導航控制次系統包含一具都卜勒導航聲納、4 具螺旋槳推進器、影像聲納、導航及運動控制電腦等。岸上電腦利用電纜與載具的控制電腦作網路通訊，水下資料即時送到岸上電腦。控制電腦為嵌入式工業用電腦、相關控制界面包含 DAC 6 channel card 及 MOTION 4 axis card 皆置於耐水壓容器中。控制電腦作業平台為 Windows 或 Linux，以提供 TCP/IP 網路功能，作為伺服器之用。根據相對於海底平面之速度積分數值，載具之 3 度空間定位資訊可由都卜勒導航聲納、磁力式航向角感測儀、傾斜儀、深度計等導航儀器提供。都卜勒導航聲納之規格如表 2.3 所示。而載具之磁力式航向角感測儀、傾斜儀、深度計規格如表 2.4 所示。載具之控制方式，操作者可由搖桿輸入速度指令，或是以自動控制模式，經由路徑規劃設計，追蹤空間參考座標以達到等深度、等速度、定向、或與岸壁維持等距離之操作模態。使用自動控制之好處，在於簡化操作者學習載具教導的過程，減輕操作載具之負荷、增加載具軌跡控制之精度，因此工作人員可集中其注意力於載具路徑規

劃及岸壁影像之判讀。

表 2.3 都卜勒速度聲納之技術規範

頻率	300KHz
使用深度	1-200m
精確度 (底部追蹤)	0.3cm/s (V=1.0 m/s)
準確度 (底部追蹤)	± 0.4%
重量 (空氣中)	9.7 kg

表 2.4 磁力式航向角感測儀、傾斜儀、深度計規格

訊號別	形式	範圍	準確度	限制
航向角	磁通式	360 deg	±5 deg	Tilt<20 deg
翻滾/俯仰角	電解液式	±15 deg	±2 deg	最大 35 deg
壓力計	壓電式	300 psi	±0.5%	

2.2.4 人機界面

載具之人機界面，其顯示內容應包含載具與操作者之即時相對位置、載具之空間軌跡即時顯示、深度、姿態角、各感測器與各螺槳馬達電壓之輸出等資訊。由操作者經由圖形界面輸入載具之控制指令，指令訊號經岸上之控制電腦及網路橋接器，由電纜下傳至水下之控制電腦。此電纜需符合下列要求：足夠強度以支持載具重量、小直徑以減低阻力、在水中具有浮力、及足夠之柔軟度以方便操作。

2.2.5 支援次系統

載具之搬運、作業時人機界面放置之場所、電源及修護工具之提供等，皆需一作業支援次系統。以小型工作船或小型卡車擔任支援次系統，作業時以懸臂吊車將載具吊放至水中，並解開吊車之鋼索，作業結束時亦使用吊車回收載具。

第三章 動力學模型及控制器設計

3.1 動力學模型

本文中使用兩個座標系來描述 ROV 的空間運動，一為空間座標系 (earth-fixed coordinate system)，另一為載具座標系 (vehicle-fixed coordinate system)，如圖 3.1 所示，其定義皆與一般船舶所使用者相同 [3]。 x, y, z 代表空間三維座標軸， ϕ, θ, ψ 代表載具之橫搖、縱搖、及平擺角。座標軸原點設在都卜勒聲納之原點，以便於運動訊號的處理。

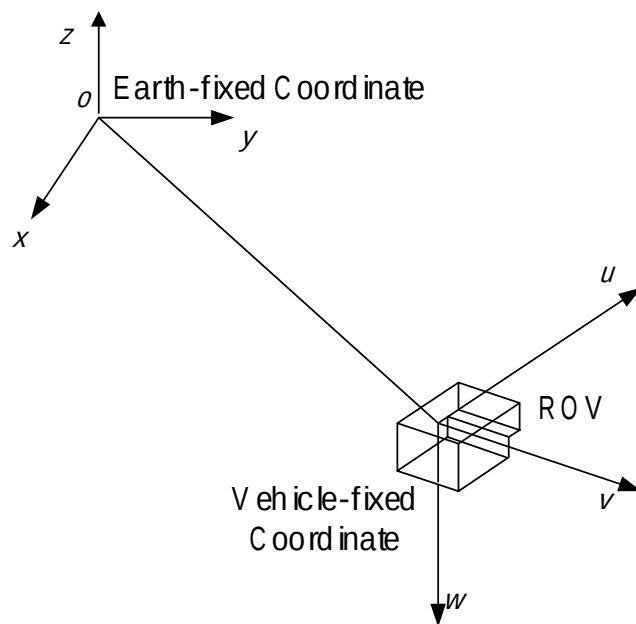


圖 3.1 水下載具之座標軸

ROV 在水平面及垂直面之運動可用各自由度上成對的螺槳推進器分別控制。在水平面上，四具螺槳推進器所推出的力在水平面之投影，可以解析出平面上的平移及旋轉之推力。兩具螺槳推力在垂直面上之投影可用來控制深度。ROV 的姿態可以用一姿態向量表示為 $\mathbf{p}$ 。 $\mathbf{p}$ 為時間 t 的函數。

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \psi \\ z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$\mathbf{p} = [0 \ 0 \ 2n\pi \ 0]^T$ 為姿態向量原點， n 為一正整數。則 姿態向量的變化率為：

$$\dot{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (3.2)$$

上式中 $\mathbf{q} = [u \ v \ r \ w]^T$ 。 u, v 為前進、平移之速度， r 代表橫搖角速度， w 則為縱移速度。由於載具之設計上皆具有扶正力矩，因此縱搖及橫搖角速度可視為微小可忽略。定義載具需達成的姿態為 $\mathbf{p}_r = [x_r \ y_r \ \psi_r \ z_r]^T$ ，而載具實際的姿態為 $\mathbf{p}_c = [x_c \ y_c \ \psi_c \ z_c]^T$ 。則姿態誤差 $\mathbf{p}_e$ 可定義為：

$$\mathbf{p}_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \psi_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_c & \sin \psi_c & 0 & 0 \\ -\sin \psi_c & \cos \psi_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_c) = \mathbf{T}_e (\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_c) \quad (3.3)$$

上式中 $\mathbf{T}_e$ 轉換矩陣，將定義於空間座標系之參考姿態及目前載具之姿態向量，重新定義於載具座標系之上。載具動態行為的數學模型可表示如下：

$$\mathbf{f}_0 = \mathbf{M}_0 \ddot{\mathbf{p}}_c - \mathbf{C}_0 \dot{\mathbf{p}}_c - \mathbf{D}_0 \dot{\mathbf{p}}_c - \mathbf{t}_0 - \mathbf{g}_0 \quad (3.4)$$

上式中， $\mathbf{M}_0$ 為載具之慣性及附加慣性項， $\mathbf{C}_0$ 矩陣為科氏效應及離心力，水動力阻尼 $\mathbf{D}_0$ 代表載具運動與流體間摩擦所造成的能量損失。 $\mathbf{D}_0$ 包含載具與流體相對速度之線性函數，以及二次函數的相關性。 $\mathbf{t}_0$ 所代表的是載具受到纜線的作用力， $\mathbf{g}_0$ 則為重力及浮力之總和。

由於載具的各自由度之運動可以分別控制，以及載具的操作狀態主要為低速下的水平面及垂直運動，因此在數學模式中，各自由度的耦合程度很小，可以被視為微量的干擾[8,9,10]。省去耦合項後，簡化的單自由度載具運動模式可以做為控制器設計的基礎。

3.2 運動控制器

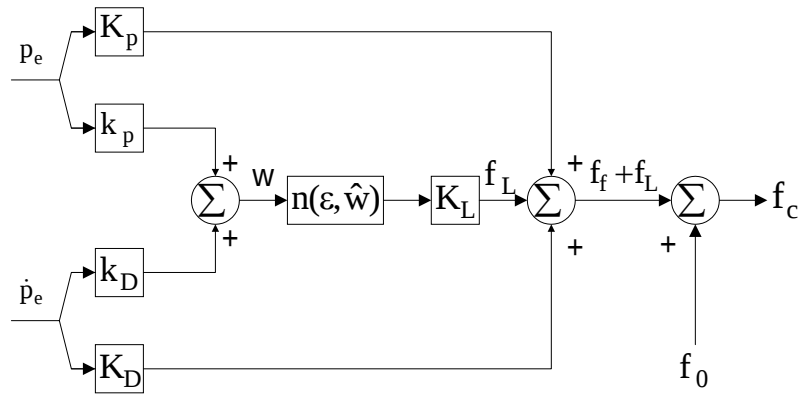


圖 3.2 運動控制器方塊圖

載具的控制器，由導航器所計算所得的誤差空間座標 p_e 及其微分 $\dot{p}_e$ 作為輸入，得到輸出值 f_c 來當作螺旋槳馬達的命令值。控制器的設計，主要的目的，是利用 P-D 加上滑動控制[11]的方法，來對系統的線性以及非線性項作控制。因為滑動控制中的滑動條件會讓系統軌跡向滑動面拘束，而系統軌跡在邊界層內時，是以 P-D 方法來控制調整。單自由度之載具之動力方程式，可分為以下三個部分：

1. 動力模型 f_0

2. 回授 f_f

3. 誤差補償 f_L

則載具之控制力可寫為

$$f_c = f_0 + f_f + f_L \quad (3.5)$$

$$f_0 = m\ddot{p}_c - \hat{c} - \hat{g} - \hat{T} \quad (3.6)$$

載具動力模型項，是表示載具受力的物理關係。我們將載具受外在環境影響的力，考慮成一線性化的模式，式中考慮的包括科氏力、重力、流體力及纜線之外力。

載具回授項由 P-D(比例-微分)控制法所構成。

$$f_f = -K_p p_e - K_D \dot{p}_e \quad (3.7)$$

P-D 控制器之轉移函數為 $K_p + K_D s$ ，此控制器對系統之作用，可以分成三個部分來討論：

1. 由 s-domain 觀點

P-D 控制器相當於原系統加入一個非零的零點(zero)，這種加入零點的方法，可以使得原系統的根軌跡有向左移的趨勢。因此，P-D 控制器可以改善系統的相對穩定度。

2. 由 frequency-domain 觀點

P-D 控制器的頻率轉移函數為 $K_p + j\omega K_D$ 。頻率越高，P-D 的值越大，所以，P-D 控制器在頻域上是一個高通的濾波器。此時，若系統出現高頻雜訊或干擾，P-D 控制器將不利於雜訊的抑制。

3. 由 time-domain 觀點

因為 D 控制器是一種預測性的控制器，它將誤差微分，可以改善系統的超越的現象，而且 P-D 控制器是一高通的濾波器，一般而言，可以增加系統的頻寬，加速系統的響應速度。就時域而言，P-D 控制器提供了良好的阻尼，改善系統時域的暫態響應，但是對於穩態並無改善作用。

誤差補償項由一飽和函數 n 構成：

$$f_L = -K_L n(\varepsilon, \hat{w}) \quad (3.8)$$

n 函數為任意片段連續函數，並且符合以下兩點描述：

$$(1) \|\hat{w}\| n(\varepsilon, \hat{w}) = \|n(\varepsilon, \hat{w})\| \hat{w}$$

$$(2) \|n(\varepsilon, \hat{w})\| \geq 1 - \frac{\varepsilon}{\|\hat{w}\|}, \quad \|\hat{w}\| > \varepsilon \quad (3.9)$$

載具誤差補償項，主要是由誤差補償矩陣 K_L 與函數 n 所組成。當 $-\varepsilon \leq w \leq \varepsilon$ 的時候， $n=0$ 。這表示在這個區域範圍內，補償項沒有作用。 n 函式與滑動模式控制中的飽和函數相當[11]。利用滑動函數的特性，可將誤差量強迫收斂至邊界層內，且於邊界層中追隨滑動面。這一項的作用主要是利用滑動模式控制的方法來消除因為系統動態的非線性及不確定性所造成的載具控制誤差量，對於穩態誤差將有所改善。

3.2.1 穩定性

螺槳馬達實際推進力 f_a ，為命令推進力 f_c 減掉 f_0 、 f_f 、 f_L 三項所累加的誤差 Δf 及螺槳馬達本身所造成之推進力誤差 δf 。故

$$f_a = f_c - \Delta f - \delta f \quad (3.10)$$

另外，由螺槳馬達所提供的實際推進力，驅動載具運動。

$$\begin{aligned} m\ddot{p}_r - c - g - T &= f_a \\ m\ddot{p}_e - c - g - T &= f_a - m\ddot{p}_c \end{aligned} \quad (3.11)$$

將(3.10)式代入(3.11)式中，得

$$m\ddot{p}_e - c - g - T = f_c - \Delta f - \delta f - m\ddot{p}_c \quad (3.12)$$

再將(3.6)、(3.7)、(3.8)式代入(3.12)式中，得

$$\begin{aligned} m\ddot{p}_e - c - g - T &= m\ddot{p}_c - \hat{c} - \hat{g} - \hat{T} - K_p p_e - K_D \dot{p}_e - K_L n(\varepsilon, \hat{w}) - \Delta f - \delta f - m\ddot{p}_c \\ m\ddot{p}_e &= -K_p p_e - K_D \dot{p}_e - \delta c - \delta g - \delta f - \delta T - K_L n(\varepsilon, \hat{w}) \end{aligned}$$

其中 $\delta c = \hat{c} - c$, $\delta g = \hat{g} - g$, $\delta T = \hat{T} - T$

定義

$$h(\xi) = -\delta c - \delta g - \delta T \quad (3.13)$$

可將 $\ddot{p}_e$ 改寫為

$$\ddot{p}_e = (1/m)(-K_p p_e - K_D \dot{p}_e + h(\xi) - K_L n(\varepsilon, \hat{w})) \quad (3.14)$$

定義

$$e = \begin{bmatrix} p_e \\ \dot{p}_e \end{bmatrix}$$

$$\text{則 } \dot{e} = \begin{bmatrix} \dot{p}_e \\ \ddot{p}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{p}_e \\ (1/m)(-K_p p_e - K_D \dot{p}_e + h(\xi) - K_L n(\varepsilon, \hat{w})) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

若定義

$$V(e) = \frac{1}{2} e^T P e \quad , \quad P = \begin{bmatrix} k_L & k_p \\ k_p & k_D \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$V(e)$ 即為一 Lyapunov 方程式，這個方程式有以下性質：

$$(1) c_1 e^2 \leq V(e) \leq c_2 e^2 \quad , \quad c_1, c_2 > 0$$

$$(2) \dot{V}(e) \leq -2\alpha[V(e) - V^*] \quad , \quad V(e) > V^* \quad (3.17)$$

$c_1 = y_{\min}$, $c_2 = y_{\max}$; $y_{\min}$ 以及 $y_{\max}$ 分別為 P 矩陣之最小及最大的特徵

值。

$$\begin{aligned}
V(e) &= \frac{1}{2} e^T P e \\
&= \frac{1}{2} [p_e \quad \dot{p}_e]^T \begin{bmatrix} k_L & k_p \\ k_p & k_D \end{bmatrix} [p_e \quad \dot{p}_e] \\
&= \frac{1}{2} (k_L p_e^T p_e + k_p \dot{p}_e^T p_e + k_p p_e^T \dot{p}_e + k_D \dot{p}_e^T \dot{p}_e)
\end{aligned} \tag{3.18}$$

$$-2\alpha V(e) = -\alpha k_L p_e^T p_e - \alpha k_D \dot{p}_e^T \dot{p}_e - 2\alpha k_p p_e^T \dot{p}_e \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned}
\dot{V}(e) &= e^T P \dot{e} \\
&= [p_e \quad \dot{p}_e]^T \begin{bmatrix} k_L & k_p \\ k_p & k_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p}_e \\ (1/m)(-K_p p_e - K_D \dot{p}_e) \end{bmatrix} \\
&= -k_p^2 p_e^T p_e + (k_p - k_D^2) \dot{p}_e^T \dot{p}_e + (k_L - 2k_p k_D) p_e^T \dot{p}_e + \\
&\quad (1/m)(k_p p_e + k_D \dot{p}_e)[h(\xi) - K_L n(\varepsilon, \hat{w})] \\
&= -2\alpha V(e) + E
\end{aligned} \tag{3.20}$$

比較(3.19)和(3.20)兩式，可以求得一組控制參數

$$\begin{cases} k_p^2 = \alpha k_L \\ k_p - k_D^2 = -\alpha k_D \\ k_L - 2k_p k_D = -2\alpha k_p \end{cases} \tag{3.21}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} k_D = 2\alpha \\ k_p = 2\alpha^2 \\ k_L = 4\alpha^3 \end{cases} \tag{3.22}$$

由(3.20)式，

$$E = w^T [(1/m)h(\xi) - K_L n(\varepsilon, \hat{w})] \quad , \quad w = k_p p_e + k_D \dot{p}_e \quad (3.23)$$

且 E 有一上界 $\bar{E}$ 。

定義

$$k_p = K_p / m \quad , \quad k_D = K_D / m \quad , \quad k_L = K_L / m \quad , \quad h = h(\xi) / m \quad (3.24)$$

上式中， m 為載具質量。 k_L 為一正函數，邊界函數可以使得 f_L 所產生的加速度大於任何由干擾項 $h(\xi)$ 所產生加速度。如此，我們才能保證系統的動態不確定因素不致影響載具的控制，而成為不可控。故 $h(\xi)/m$ 的最大值便是 k_L ，才能符合以上的條件。再將上界 $\bar{E}$ 與(3.17)式的性質(2)比較，可得

$$V^* = \bar{E} / 2\alpha \quad (3.25)$$

因為估測值等於實際測量值加上感測器誤差值

$$\hat{w} = w + \delta w \quad (3.26)$$

所以，(3.23)式可改寫為

$$\begin{aligned} E &= w^T h - w^T k_L n(\varepsilon, \hat{w}) \\ &= (\hat{w} - \delta w)^T h - (\hat{w} - \delta w)^T k_L n(\varepsilon, \hat{w}) \\ &= \hat{w}^T (h - k_L n(\varepsilon, \hat{w})) - \delta w^T (h - k_L n(\varepsilon, \hat{w})) \end{aligned} \quad (3.27)$$

將 n 函數用 $1 - \frac{\varepsilon}{\|\hat{w}\|}$ 替代

$$E = \hat{w}h - \hat{w}k_L + \hat{w} \frac{k_L \varepsilon}{\|\hat{w}\|} + [-\delta w(h - k_L n)] \quad (3.28)$$

代入 h 的最大值 k_L ,

$$E = \hat{w} \frac{k_L \varepsilon}{\|\hat{w}\|} + [-\delta w(h - k_L n)] \quad (3.29)$$

將(3.29)式取絕對值，得

$$\begin{aligned} \|E\| &= \|k_L \varepsilon\| + [\|\delta w h\| + \|\delta w k_L n\|] \\ &= \|k_L \varepsilon\| + [\|\delta w k_L\| + \|\delta w k_L n\|] \\ &\leq \|k_L \varepsilon\| + \|\delta w k_L\| + \|\delta w k_L\| \end{aligned} \quad (3.30)$$

所以，

$$\bar{E} \leq k_L (\varepsilon + 2\delta \bar{w}) , \quad \delta \bar{w} \geq \delta w \quad (3.31)$$

由(3.31)式中，我們可以知道，系統的誤差受限於：

- 1.載具模式的不確定性。因為載具數學模式具有不確定性，故會造成控制上的誤差。
- 2.螺槳馬達的推力誤差。
- 3.感測器的雜訊。

這三種因素，合成誤差的上界，也是控制系統功能的極限。

3.2.2 收斂速度

由(3.20)，可以反推得知

$$V(e) = V^* + [V(t_0) - V^*] \exp(-2\alpha(t - t_0)) \quad (3.32)$$

將 $V(e)$ 用 P 之最小特徵值 $y_{\min}$ 表示

$$y_{\min} e^2 \leq y_{\min} \rho^2 + [V(t_0) - V^*] \exp(-2\alpha(t - t_0)) \quad , \quad \rho = \sqrt{V^* / y_{\min}} \quad (3.33)$$

所以，由上式可知

$$e \leq \rho + \sqrt{[V(t_0) - V^*] / y_{\min}} \exp(-\alpha(t - t_0)) \quad (3.34)$$

上式顯示各自由度追蹤誤差量呈指數函數的型態收斂，並且趨近於 ρ 。

本計畫所發展的運動控制方式為一穩定的控制器。可以獲得與系統性能參數 α 與 P - D 及控制增益之關係式，可以簡單地決定出這些關鍵的控制增益，在控制器的設計上，能夠提供設計者一個方便有效的設計方法。

第四章 運動模擬

4.1 螺槳推力分配

本計畫所規劃之載具，將使用四具螺槳推進器，以推力分配的方式，產生水平面直線及旋轉運動，以及垂直上下之運動。由於平面運動與垂直運動之間不耦合，因此只需分析載具平面運動之螺槳輸出力關係。其中 F_1 ， F_2 為螺槳 1 與螺槳 2 在 x 方向的推力分量， F_3 ， F_4 為螺槳 3 與螺槳 4 在 y 方向的推力分量。 L_2 ， L_1 ， L_3 ，及 L_4 分別為螺槳推力與座標中心點的力臂長度。

$$\begin{cases} F_x = F_1 + F_2 \\ F_y = F_3 + F_4 \\ M_z = F_1 \times L_1 - F_2 \times L_2 + F_3 \times L_3 - F_4 \times L_4 \end{cases} \quad (4.1)$$

上式中， F_x ， F_y ，及 M_z 分別代表在 x 方向， y 方向的推力總和，以及 z 方向的力矩總和。此式可改寫為

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ L_1 & -L_2 & L_3 & -L_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

令

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ L_1 & -L_2 & L_3 & -L_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

所以，

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A} \mathbf{X} \quad (4.5)$$

設最佳化函數為 J 為：

$$J = \left| \mathbf{X}^T \mathbf{X} \right| + \lambda^T \left| \mathbf{Y} - \mathbf{A} \mathbf{X} \right| \quad (4.6)$$

其中 λ^T 為 3×1 向量(Lagrange multiplier)

最佳化得

$$\frac{\partial J}{\partial \lambda} = 0, \frac{\partial J}{\partial \mathbf{X}} = 0 \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \mathbf{X}} &= 2\mathbf{X}^T - \lambda^T \mathbf{A} = 0; \Rightarrow 2\mathbf{X} = \mathbf{A}^T \lambda \\ \frac{\partial J}{\partial \lambda} &= \mathbf{Y} - \mathbf{A} \mathbf{X} = 0; \Rightarrow \mathbf{Y} = \mathbf{A} \mathbf{X} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \frac{1}{2} \mathbf{A}^T \lambda \\ \mathbf{Y} &= \frac{1}{2} \mathbf{A} \mathbf{A}^T \lambda; \Rightarrow \lambda = 2 \left(\mathbf{A} \mathbf{A}^T \right)^{-1} \mathbf{Y} \end{aligned} \quad (4.9)$$

因此

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^T \left(\mathbf{A} \mathbf{A}^T \right)^{-1} \mathbf{Y} \quad (4.10)$$

根據上式所推得的螺槳輸出關係，決定平面四個螺槳輸出值，可解得四具螺槳的推力。由於各螺槳之推力計算使用最小平方差法求得（式 4.6），因此真實推力的需求與實際推力指令間存在誤差，此誤差為造成控制誤差的因素之一。

4.2 螺槳推力數據

本計畫擬使用之螺槳推進器之外型及螺槳尺寸如圖 4.1 所示。表

4.1 為此螺槳推進器在靜止下的推力與電壓關係，圖 4.2 為此數據之圖形表示。在圖 4.3 中，以二次曲線近似螺槳電壓與推力性能曲線，其中明顯可見在電壓輸出 $\pm 0.5\text{ V}$ 之區域，由於軸系防水壓設計，以及摩擦力等因素，螺槳不輸出推力，稱為螺槳不反應區。此不反應區為造成控制誤差之主要因素之一。在控制時，所需之推力可經由此二次方程式反推回需輸出之電壓值。

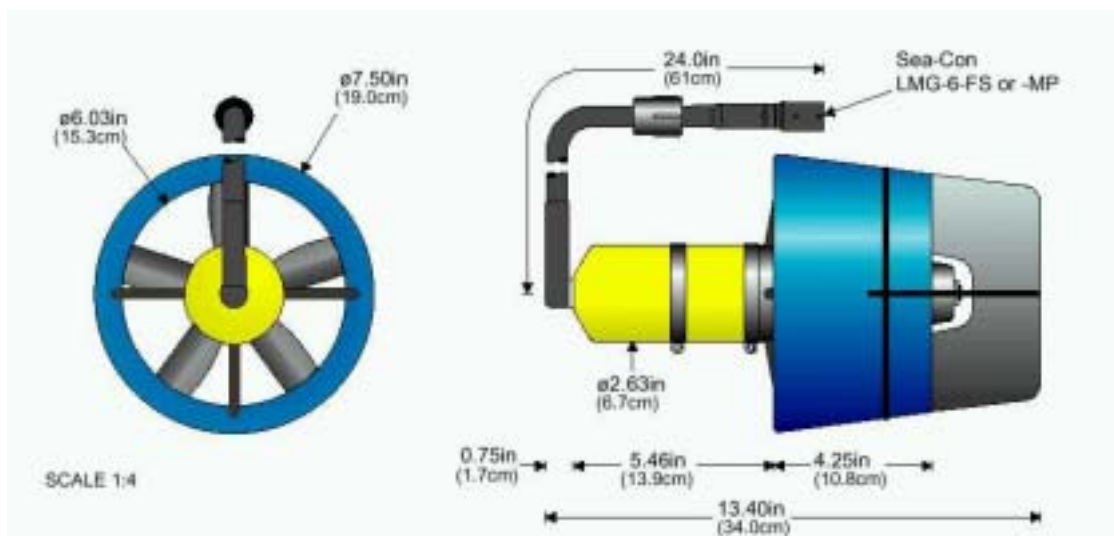


圖 4.1 螺槳尺寸

表 4.1 螺槳推力數據

電壓(V)	-5	-4.5	-4	-3.5	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.5
推力(Kgf)	-6.5	-6	-5	-3.5	-2.5	-1.5	-1	-0.5	-0.2	0
電壓(V)	5	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1	0.5
推力(Kgf)	11	10	7	5.5	3.5	1.5	1	0.5	0.2	0

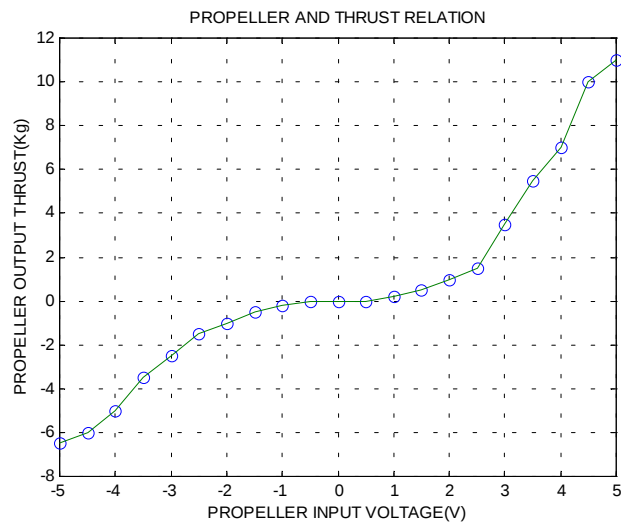


圖 4.2 螺槳推力曲線

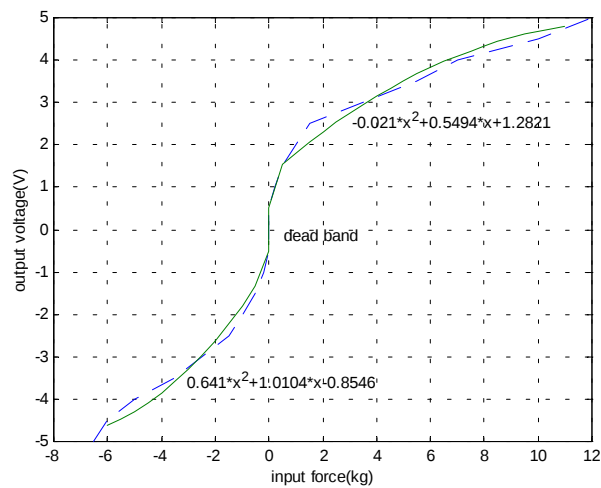


圖 4.3 以二次方程式近似螺槳推力與電壓關係

4.3 系統模擬

本計畫規劃之水下載具，其外型及主要規格於圖 2.1 及表 2.1 中所示。由於開框架載具的形狀不對稱，因此在不同的運動方向及運動速度下，會導致不同的動態反應，其運動特性可以用運動方程式之解來

表示。本計畫以運動方程式來描寫載具在各方向的運動，合理假設其模式之參數，以做為動態模擬的基礎。未來載具硬體完成之後，將以實驗方法，鑑定運動方程式之參數，建立其數學模型。本節建立載具水平面及垂直面方程式，來模擬水下載具之開回路系統動態，假設每一個自由度均可以被單獨控制，互相不干擾，則載具之運動方程式可以表示為：

$$\begin{bmatrix} m_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u|u| \\ v|v| \\ r|r| \\ w|w| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \\ F_z \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

其中 u 、 v 、 r 分別為縱移、橫移及平擺之速度、角速度， w 為垂直面運動速度； m_v 、 m_u 為載具在縱移及側移方向之質量及附加質量， I_r 為平擺之轉動慣量， m_w 為垂直面之質量及附加質量； b_u 、 b_v 為縱移及側移方向之阻尼係數， b_r 為平擺之阻尼係數， b_w 為垂直面運動方向之阻尼係數； F_x 、 F_y 、 F_z 為螺槳推力， M_z 為轉矩。上式中假設載具在各維度的運動之耦合很小，為了簡化控制器設計，可以忽略其耦合項。此假設在低速運動時為一合理假設，未來可經由實驗結果來驗證此假設。圖 4.4 所示為各自由度之控制器設計架構。

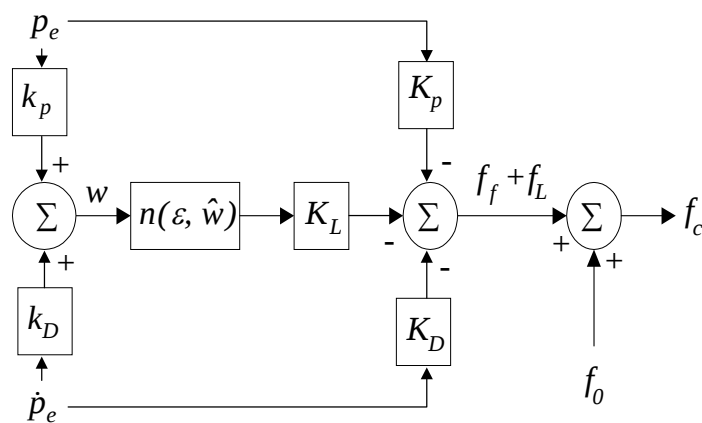


圖 4.4 載具單一自由度控制器架構

表 4.2 各運動方向之模式參數

運動方向	質量 ($\text{kgf} \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$) 或轉動慣量 ($\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$)	直線運動阻尼係 數 ($\text{kgf} \frac{\text{s}^2}{\text{m}^2}$) 或轉動阻尼係數 ($\text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$)
前進縱移	10	20
後退縱移	10	25
右向橫移	50	35
左向橫移	50	30
左旋平擺	7	5
右旋平擺	7	5
垂直向上	55	20
垂直向下	55	20

表 4.2 所示為模擬各運動方向之系統參數。在縱移運動時，由於載具移動距離較大，纜線對載具的作用力是一個不確定之作用力，此作用力並未包含在系統之模式中，而是以一干擾力來考慮對控制性能的可能影響。在側移運動上，由於載具移動距離較小，故纜線對載具的作用力影響不大。在平擺運動上，纜線隨著載具旋轉，而造成載具在不同角度時，纜線對載具的作用力也隨之改變，因此開回路下，由於纜線扭轉所產生的轉矩施於載具，其轉角速度會呈現週期性的變動。

4.3.1 n 函數設計

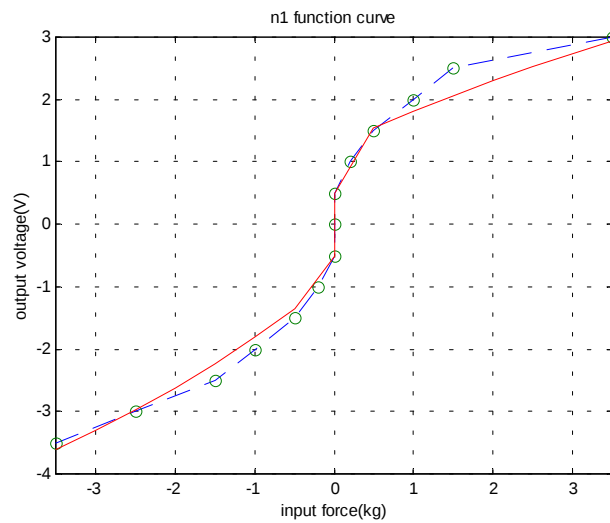


圖 4.5 n_1 函數(實線為函數曲線，虛線為螺槳推力數據)

依據第三章控制器設計方法所提出之 n 函數，在此設計四個不同的 n 函數。根據螺槳靜止時推力性能，將最大推力設定在 $\pm 3.5\text{kg}$ 之間， n_1 函數設定為螺槳之特性曲線(圖 4.5)， n_2 函數為一次線性且有不反應區之特性曲線(圖 4.6)， n_3 函數為一線性且無不反應區之特性曲線(圖 4.7)， n_4 函數之飽和增益值為螺槳之最大推力(圖 4.7)。

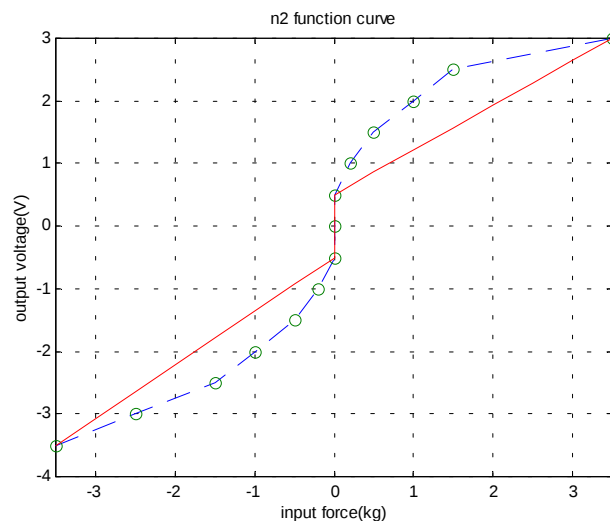


圖 4.6 n_2 函數(實線為函數曲線，虛線為螺槳推力數據)

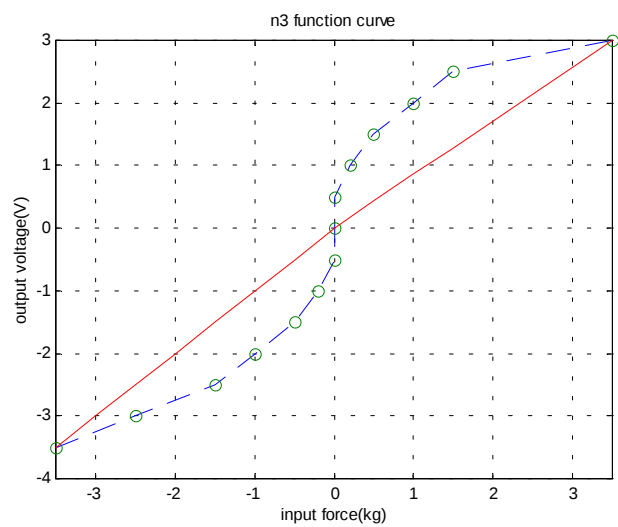


圖 4.7 n_3 函數(實線為函數曲線，虛線為螺槳推力數據)

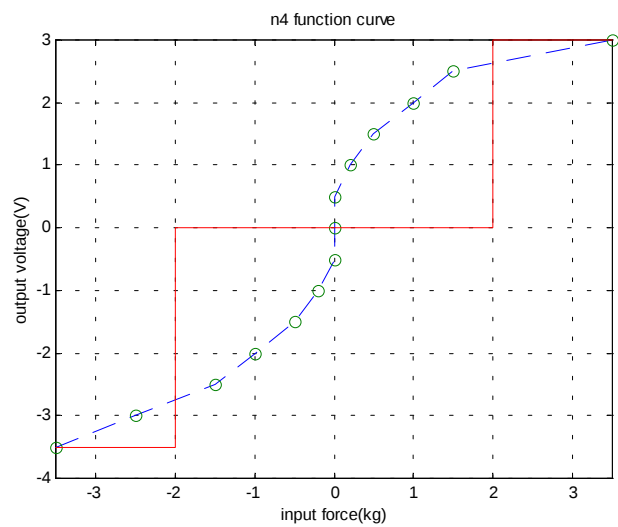


圖 4.8 n_4 函數(實線為函數曲線，虛線為螺槳推力數據)

圖 4.9 所示為使用不同的不反應區域，所得之深度控制資料，我們經由不同的不反應區域來觀察系統穩態誤差及收斂情況之比較。本實驗之控制深度為 2 公尺，可以知道不反應區域之大小對深度控制之穩定性有關，而其控制結果如下表：

表 4.3 不反應區域之大小對 $n1$ 函數在深度控制影響

不反應區域電壓	穩態誤差	收斂情況
0V	0.36 m	收斂
0.1V	0.03 m	收斂
0.2V	-	振盪
0.3V	-	振盪
0.4V	-	發散
0.5V	-	發散

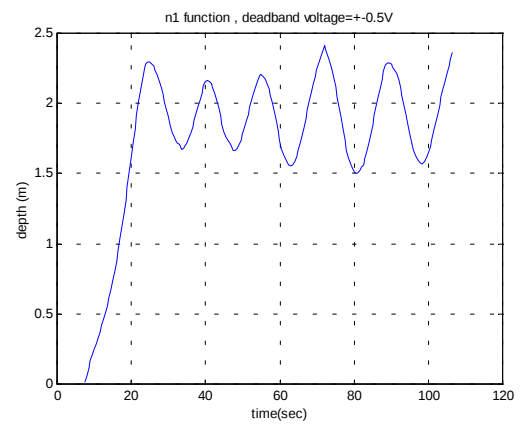
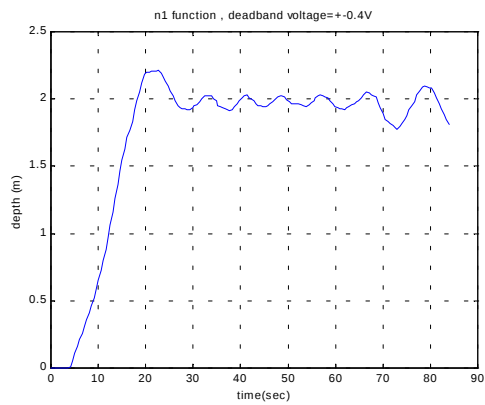
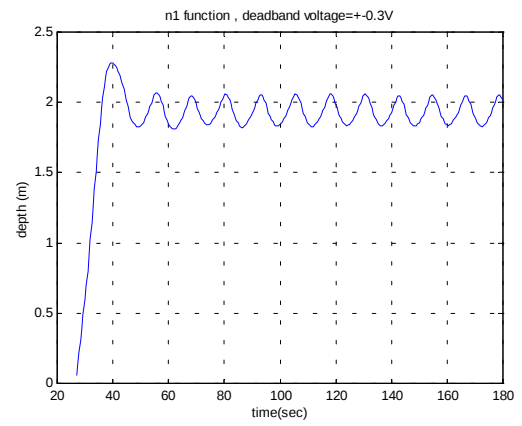
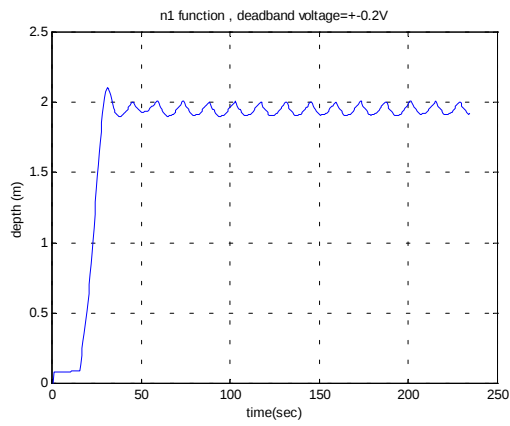
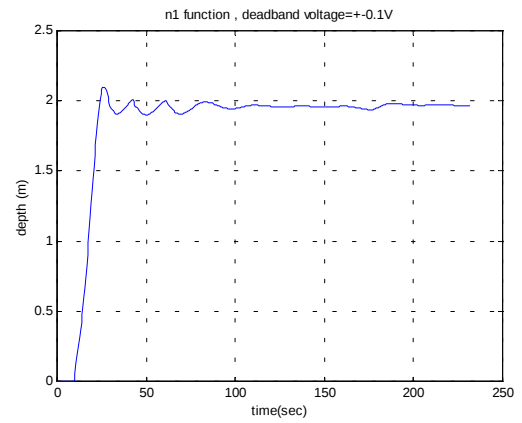
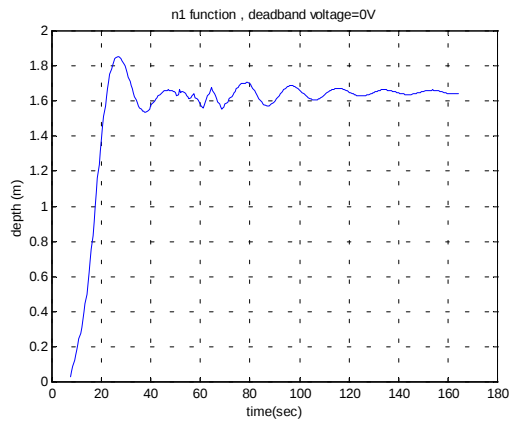


圖 4.9 不反應區域對深度控制的影響 (n1函數)

圖 4.10 所示使用不同 n 函數，對深度控制的效應。本模擬實驗之控制深度為 2 公尺，可以觀察不同 n 函數對深度控制之穩定性的影響，其深度控制結果如下表：

表 4.4 不同 n 函數在深度控制結果

函數種類	不反應區域電壓	穩態誤差	收斂情況
$n2$ 函數	0V	0.59 m	收斂
$n2$ 函數	0.5V	0.34 m	收斂
$n2$ 函數	1V	0.13 m	收斂
$n2$ 函數	1.2V	0.02 m	收斂
$n3$ 函數	-	0.52 m	收斂
$n4$ 函數	-	-	振盪

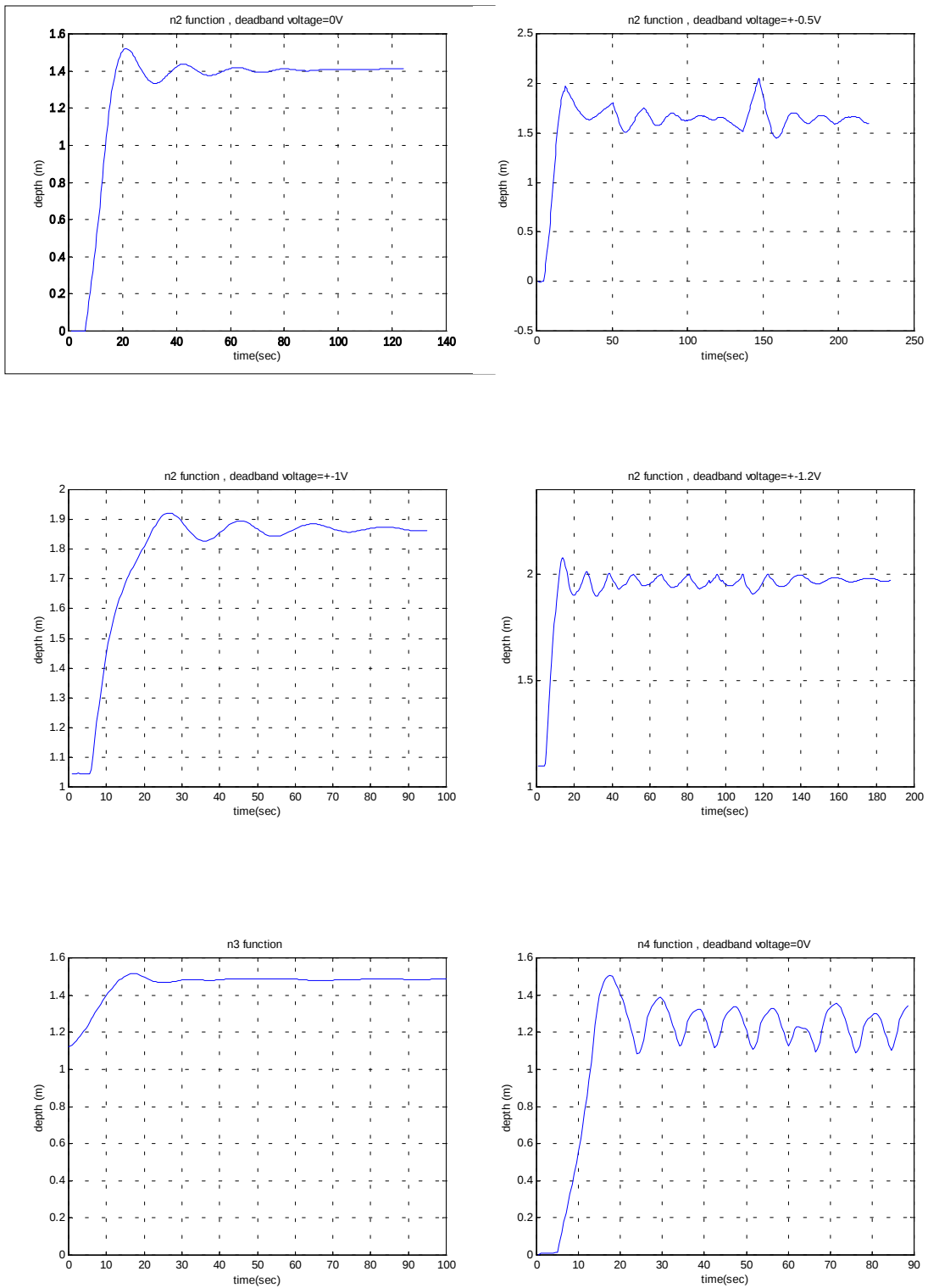


圖 4.10 n 函數對深度控制的影

由以上四組 n 函數所產生的數據我們可以得到一個推論如下： $n1$ 函數曲線和螺槳性能曲線相近，其所得到的控制效果最佳。因載具有固定之淨浮力，為了達到深度控制之穩態誤差及振盪最小之目的，必須調整一個補償電壓值以抵消載具之浮力，此補償電壓相當於前述之不反應區之最大值，當此補償電壓值微大於浮力時，其穩態收斂及有振盪之現象；當此補償電壓值遠大於浮力時，其誤差有振盪發散之現象；此補償電壓值小於浮力時，其穩態誤差將會變大，振盪亦比有正確補償電壓情況大，但其收斂時間較長。在本模擬實驗中，最佳函數為 $n1$ 函數曲線，且最佳補償電壓為 $0.1V$ 。 $n2$ 函數與 $n1$ 函數較為近似，但在設定深度時，其所需要之補償電壓值要比 $n1$ 函數大，才能將穩態誤差拉小，同時，其收斂又將呈現振盪之現象。在補償電壓值之調整上，因載具本身略輕於水，當 n 函數和螺槳性能曲線極為相似時，其補償電壓值之調整只須在零點做小部份之調整即可，若穩態誤差仍大，則可略微加大補償電壓；當振盪現象無法獲得改善時，則可略微減小補償電壓；因為載具之任務要求為水下定位攝影，故考慮穩態誤差與振盪之妥協下所得到的補償電壓值，即為載具系統較佳之補償電壓值。

4.3.2 路徑追蹤

本節利用模擬方法，探討控制器在水平面角度控制，以及三維路徑追蹤之控制性能，以做為實體載具控制器設計之依據。

首先測試角度控制之步階響應。實驗條件為給定一個角度(340度)，讓載具只有旋轉運動，測試載具是否能夠收斂且不發散，控制參數為 $x_\alpha=0.2$, $y_\alpha=0.4$, $\psi_\alpha=0.3$ ，其穩態誤差為 0.39 度。(圖 4.11)

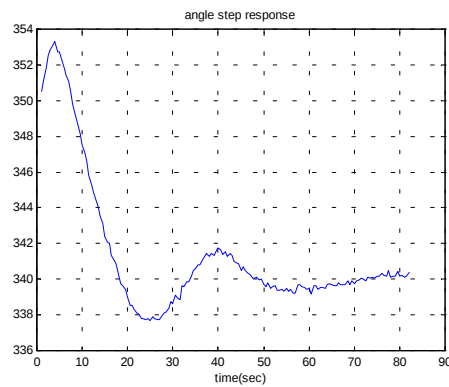


圖 4.11 閉迴路角度步階響應

路徑實驗條件:給定一個目標點，距離載具為 $x=2$ 公尺， $y=0.5$ 公尺，讓載具只有水平面的運動，測試載具之位置是否能夠達到目標點，將參數設計為 $x_\alpha=0.2$ ， $y_\alpha=0.4$ ， $\psi_\alpha=0.3$ ，其穩態誤差在 x 軸為 $3.9e^{-2}$ 公尺，在 y 軸為 $1.0e^{-2}$ 公尺。(圖 4.12)

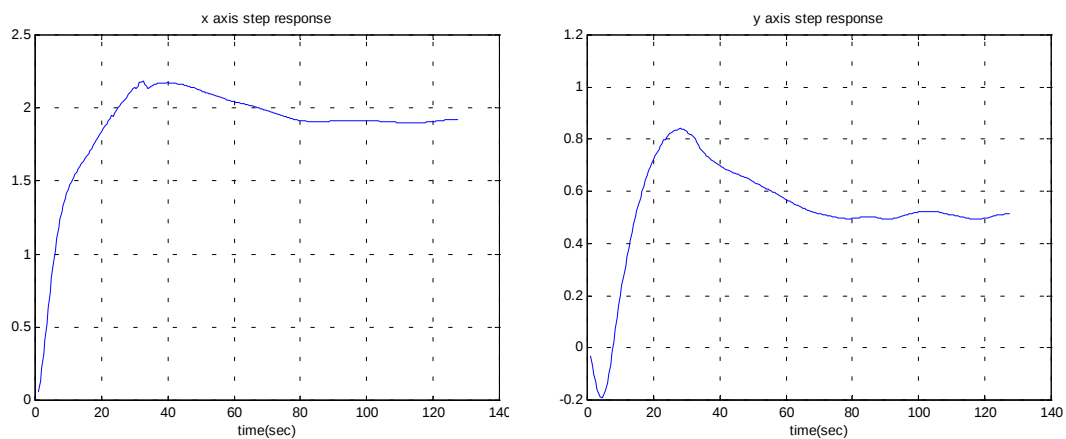


圖 4.12 閉迴路路徑步階響應

4.3.3 有洋流下的控制模擬

圖 4.13 所示為假設之洋流所造成載具運動。在圖 4.13 中，載具未接受位置控制，因此所顯示之位置變化完全由洋流所致，此圖顯示載具在 180 秒內被水流飄移 5 公尺，過程中包含朝向角度的變動，以及都卜勒 Z 軸變化積分所得之深度誤差、深度計之誤差等。

在三維運動控制方面，模擬條件為給定一個固定深度，以控制器來作為 Z 軸之深度控制，而平面的運動則以 PD 及滑動控制來實現載具在平面之運動控制。載具在控制深度時，以都卜勒 Z 軸變化積分所得之深度數據可能有很大的誤差產生，因此必須配合深度感測器之量測數值，來估計載具之真實深度。都卜勒 Z 軸變化積分所得之深度，可能受海底坡度之急遽變化，而產生較大的誤差，深度計之數值，則易受波浪大小的影響。至於控制參數對載具的影響，可以歸納如下：當參數值較大時，載具之速度加快，但航行速度較不穩定；而當參數較小時，載具之速度變慢，且航行速度較穩定。在此路徑運動控制上，深度和平面運動是分別由二個不同控制器在控制；在深度控制上，經由之前 n 函數的實驗可得到最佳的一組參數，其函數為 $n1$ 函數，補償電壓為 $\pm 0.1V$ ；而在平面路徑運動控制上，使用的控制方法為第三章所提及的導航及控制器之設計方法，所使用的控制參數為進前運動：

$x_\alpha=0.2$, $y_\alpha=0.4$, $\psi_\alpha=0.3$ ，側向運動： $x_\alpha=0.2$, $y_\alpha=0.4$, $\psi_\alpha=0.4$ 。經由模擬證明，各維的運動可以獨立控制，且其控制效果良好。(圖 4.14)

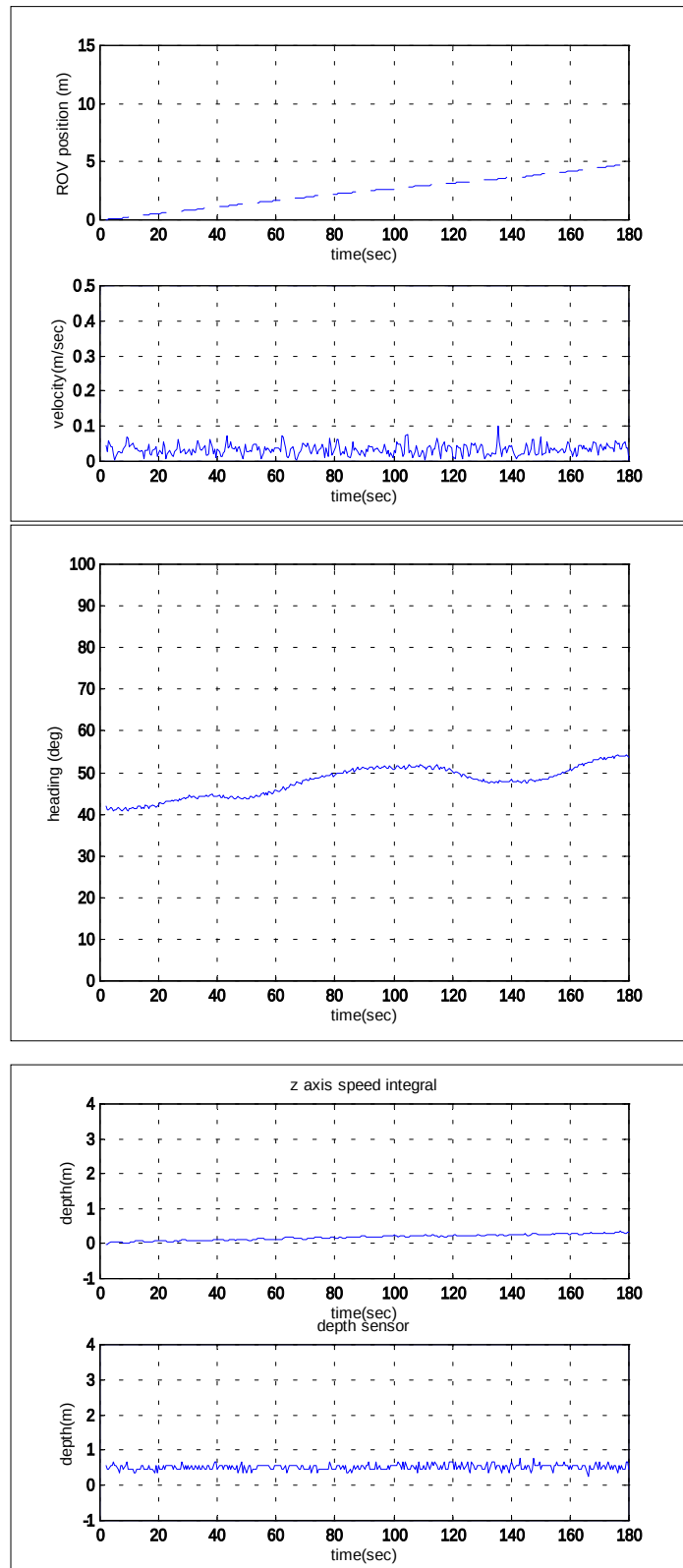


圖 4.13 洋流造成載具運動

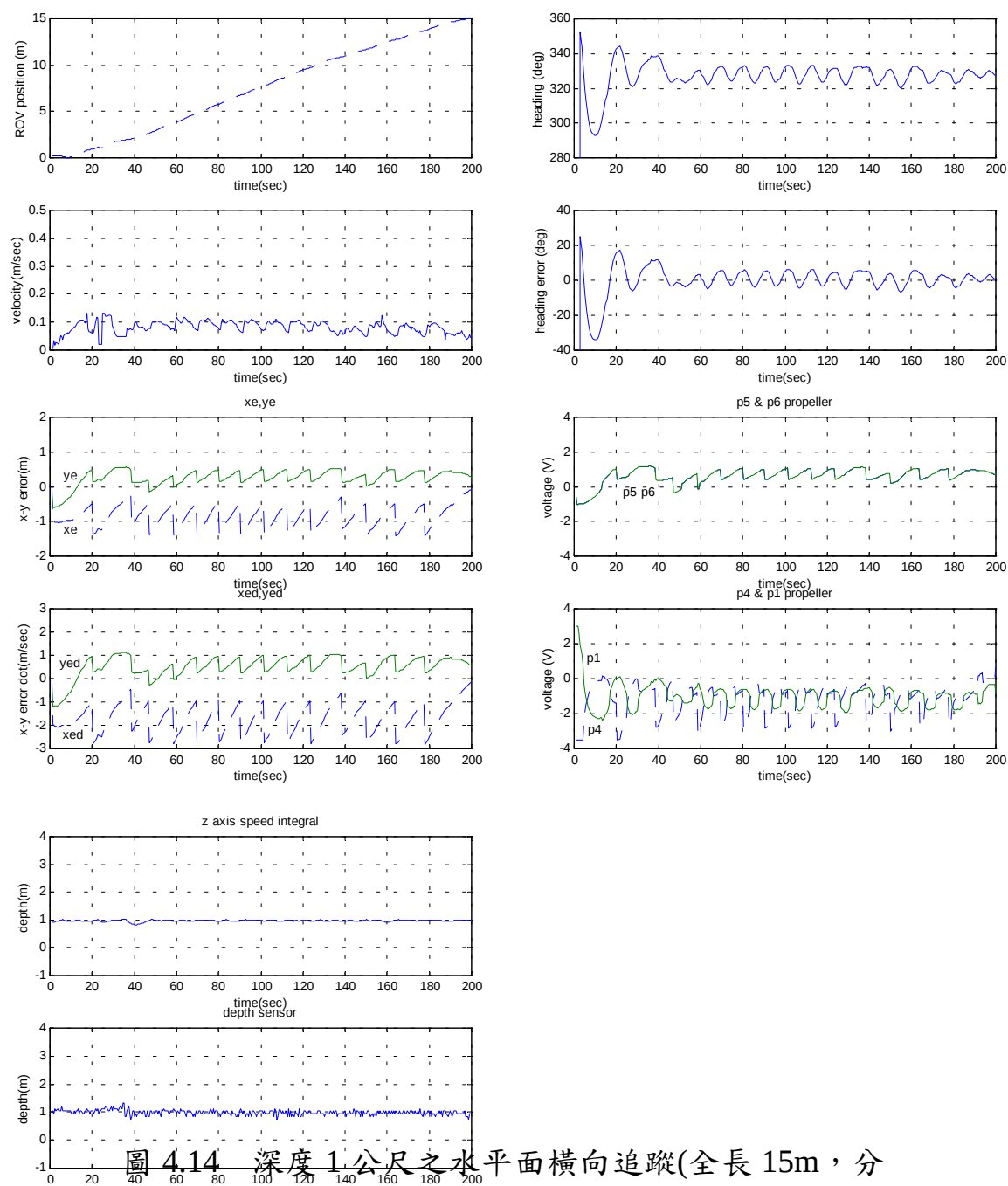


圖 4.14 深度 1 公尺之水平面橫向追蹤(全長 15m，分成 15 個目標點)

第五章 作業系統規劃

5.1 載具之初步設計

載具之初步設計，採用開框架，框架上製作都卜勒導航聲納、攝影機、影像聲納、螺槳等之固定夾具，本年度之預定製作進度為框架及夾具之設計製作及組裝，已完成框架、夾具、機械式轉動機構（用以轉動視訊攝影機）。成品如圖 5.1 所示。



圖 5.1 水下載具框架及夾具

5.2 感測器訊號整合

圖 5.2 所示為本計畫所規劃潛艇之軟體架構。以下分別說明導航器、控制器之設計概念。

1.狀態估測及導航

導航元件之種類包括磁力式航向角感測儀、光纖陀螺儀、深度計、都卜勒聲納、以及由視訊及聲訊影像所求取之環境特徵座標。導航系統之工作原理為量取潛艇與海底之相對速度，經由積分而得到位置。速度的量測值有一定的雜訊及誤差，而積分的過程中誤差會累積，所以我們得到的位置資訊，在一段時間的連續運作後，會發散而無法使用。因此現有導航系統在運作某一定週期後，可使用環境特徵影像做修正。而經由影像處理所取得之環境特徵位置雖然準確，但資料處理需要一定的時間間隔，所以無法做任意的連續測量，使用影像資訊導航之好處則在於誤差不會因長時間的使用而累積。

導航器之建構方法擬使用卡爾曼濾波器(Kalman Filter)之架構，以整合導航資料，此卡爾曼濾波器程式根據已知或估測的儀器測量誤差，及潛艇的動態特性，提供潛艇即時的位置和姿態估測，而此位置和姿態估測數值即為伺服控制系統中之回授訊號。

2.運動控制及路徑追蹤

影像伺服控制是以影像中之特徵值位置做為控制的依據，由於誤差是定義在影像空間，而非在潛艇的座標系，因此需要將影像中特徵值位置轉換為攝影機(潛艇)對特徵的誤差，才能對潛艇進行控制。潛艇在空間之運動有六個自由度，但是由視訊及聲訊影像所推得攝影機速度僅有四維的資訊，亦即所觀測之參數數目不足，無法完全計算潛艇所有方向的速度，需要由現有之導航儀器，如方位儀、都卜勒聲納等提供不足之資訊，才能完整地計算潛艇的速度，並使用潛艇之數學運動模式，根據非線性控制理論所設計之控制器，以求得控制性能與系統參數間之關係，並保障導航控制系統的穩定性。

因水下能見度之限制，使用視訊攝影機之成像範圍往往只能侷限於被觀測物的一小部份，雖然藉由潛艇之位移，操作人員可經由連續之視訊影像而觀察各個局部細節，但無法獲得被觀測物之全貌。經由導航資料比對，可以將水下多幅視訊影像拼嵌於適當位置後，顯示出的大範圍影像合成。

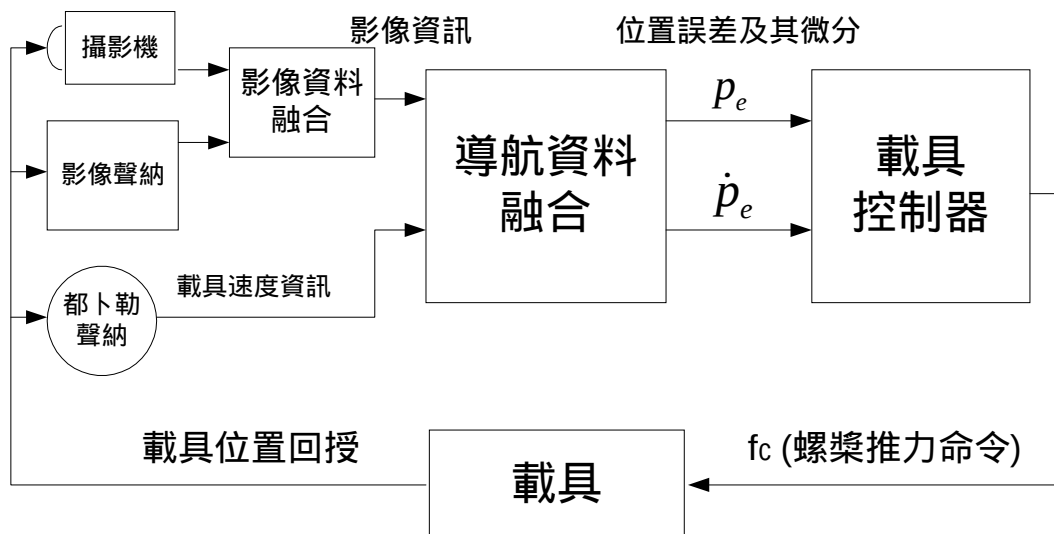


圖 5.2 感測器訊號整合架構

5.3 水下檢測任務規劃

文獻[13]為水下機器人應用於港灣工程之研究成果介紹，包含開發步行式機器人、遙控式機械手臂在港灣施工、量測的相關研究成果等。其中步行式機器人可用於潮間帶地形調查，其足部的設計適於行走於沙地上。在遙控載具的應用上，利用裝置在一具現成的怪手機具上的力回授設備，配合驅動連桿及抓爪機構，形成一閉迴路控制系統，以抓取及操作大型工件，可用於港灣水下施工，如消波塊之擺放等工作。文獻[14]為使用自主式機器人在水下觀測之構想。由於水下結構物表面通常有生物附著，此文獻提出使用雷射測距，以定位觀測物之做法，並不適用於真實環境。本計畫之水下檢測任務使用 5.1 節所述之導航及控制方法，將載具帶領至正確位置，施行水下攝影等工作。狀態估測器利用載具所攜帶的感測器，以及環境的地圖，估測載具的水平面位置、朝向角以及深度。運動控制器產生螺槳推力指令，使載具追隨觀測路徑。環境地圖及觀測路徑之示意圖如圖 5.3 所示。

環境地圖 M 由一連串線段組成被觀測物體之外型，觀測路徑 W 則由一組路由點所組成。 M 及 W 必須由使用者在作業之前設定。

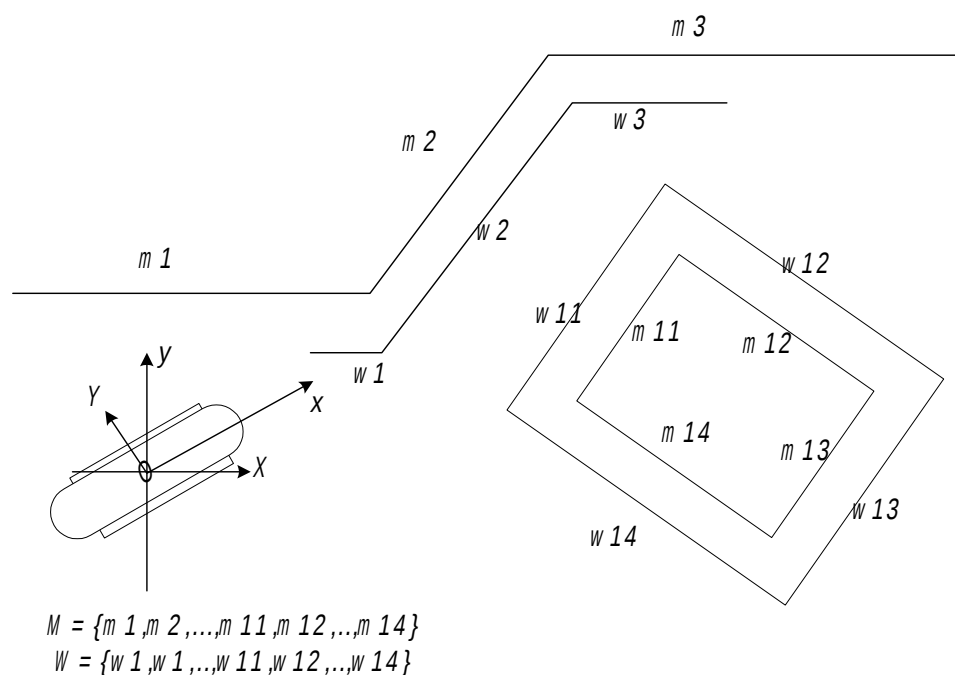


圖 5.3 環境地圖及觀測路徑

本計畫以水下結構物表面之觀測為目標。由於防波堤經常承受較大波浪拍擊及長年浸泡於海水中，混凝土容易形成劣化，結構體易發生破裂塌陷等損壞，本研究設定之觀測任務以防波堤沈箱之水下觀測為主。防波堤沈箱之大小，以蘇澳港為例，長度約為 25m，水深約為 15m-20m，基礎拋石水平面寬度約為 5m。[15] 水下載具可以從事下列幾項例行性觀測任務：

1. 拋石觀測：載具以等速度，沿著沈箱表面，以距離拋石面等深度之姿態航行，航行過程以視訊攝影方式取得拋石基礎的影像。
2. 沈箱面觀測：以一次觀測一座沈箱為原則，載具以等深度沿著沈箱表面航行，到達一端後，改變深度，沿沈箱表面回到起始端。經

過多次的不同深度觀測結果，可以整合出整體沈箱表面的影像資料。

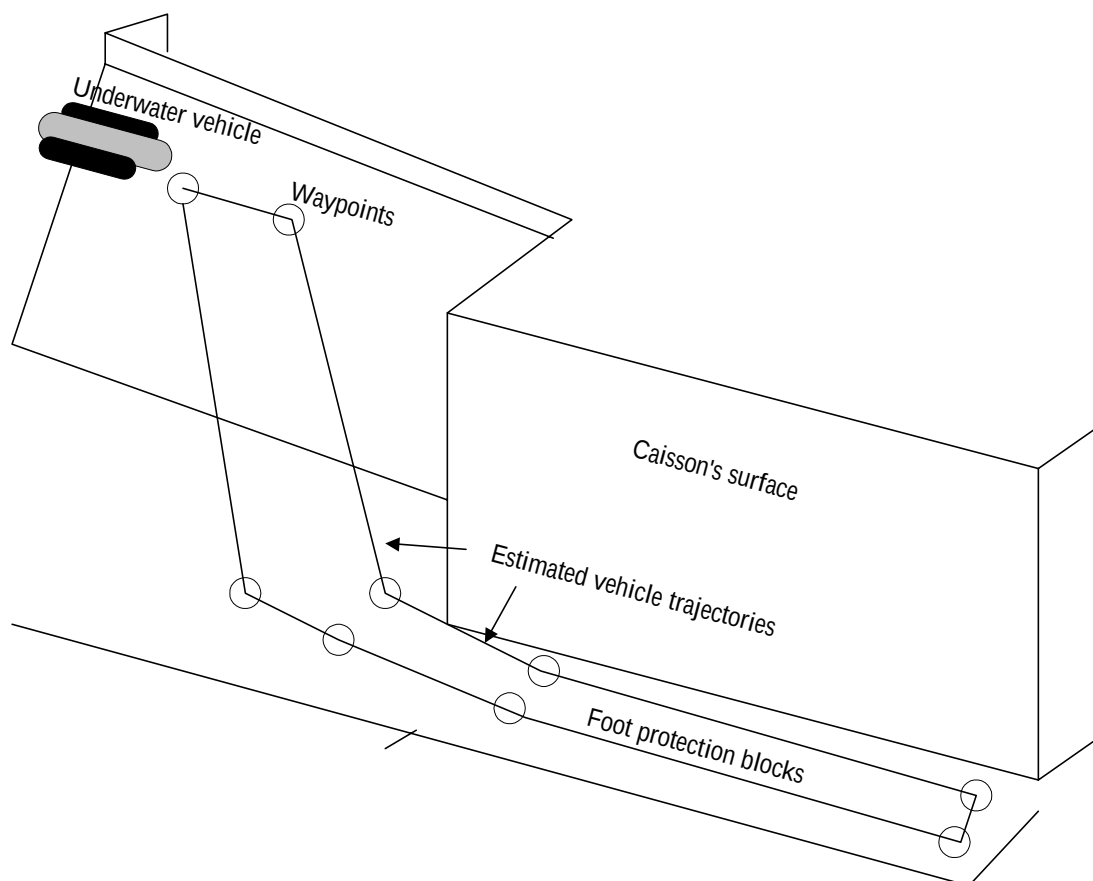


圖 5.4 拋石觀測任務示意圖

圖 5.4 所示為海底觀測任務的示意圖。載具先由操作人員引導至起始區域，啟動狀態估測器及運動控制器，載具下潛至觀測路徑之路由點起點，依序追蹤各路由點，其過程如第四章所模擬者。航行速度約為 0.2m/s ，以觀測路徑全長 200m 為目標，則全程觀測取樣歷時約 16 分鐘。

第六章 結論與建議

本報告為計畫第一年期之報告。第一年期主要研究課題包含：

1. 運動數學模式之建立

本研究建構之數學模式包含載具及控制螺槳在內為一整體之載具系統，描述其運動數學模式。本計畫並根據數學模式建立載具之運動控制器，確立控制系統的穩定性。

2. 系統運動模擬計算程式之撰寫與試算

依循步驟 1 所建構之數學模式，撰寫載具系統運動模擬計算程式並做初步試算與確認。

3. 載具系統原型的初步設計與性能分析

依據步驟 2 探討的結果，採用適宜之外形尺寸以進行系統原型的初步設計，並進行外殼、支架之製作組裝。

本期報告已完成上述工作，下期計畫將進行控制方法之驗證、水下機器人本體設計與製作。

參考文獻

1. M. Caccia and G. Veruggio, "Modeling and Identification of Open-Frame Variable Configuration Unmanned Vehicles", *IEEE Journal of Ocean Engineering*, VoL.25, No.2, April 2000. (遙控水下載具建模及系統鑑定)
2. F. S. Hover, M. A. Grosenbaugh, M. S. Triantafyllou, "Calculation of Dynamic Motions and Tensions in Towed Underwater Cables," *IEEE Journal of Ocean Engineering*, VoL.19, No.3, pp.449-457, 1990. (拖曳式水下載具纜線動力特性之探討)
3. W. Koterayama, S. Yamaguchi, T. Yokobiki, J. H. Yoon, H. Hase, "Space-time Measurements on Ocean Current and Chemical Properties with the Intelligent Towed Vehicle 'Flying Fish'," *IEEE Journal of Ocean Engineering*, VoL.25, No.1, pp. 130-138, 1990. (拖曳式水下載具系統設計及應用實例)
4. 鄭勝文, 邱逢琛, 蔡進發, 郭振華"「自主式水下載具整合型計畫」成果報導", *科學發展月刊*, 第二十六卷, 第一期, 1998. (自主式水下載具系統設計及導航控制之成果介紹)
5. 郭振華, 邱逢琛, 賈景光, "自主式水下載具整合型導航系統之研究", *中國造船暨輪機工程學刊*, 第十九卷第三期, pp.33-42, 2000. (自主式水下載具整合型導航系統之建置與性能測試)
6. F. C. Chiu, J. Guo, C. C. Huang, J.P. Wang, "On the Linear Hydrodynamic Forces and the Maneuverability of an Unmanned Untethered Submersible with Streamlined Body (2nd report : Lateral Motion)," No. 182, *Journal of the Japanese Society of Naval Architecture*, pp. 151-159, 1997. (in Japanese) (巡航式水下載具流體性能設計及建模)
7. 郭振華, 邱逢琛, 林明坤, "自主式水下載具長基線聲波定位系統之淺海域性能測試", *中國造船暨輪機工程學刊*, 第十八卷第

四期 , pp. 13-24 , 1999。 (長基線聲波定位系統之建置與性能測試)

8. W.C. Lam and Tamaki Ura, “Non-Linear Controller with Switched Control Law for Tracking Control of Non-Cruising AUV”, IEEE, AUV 96 Monterey, California, June3-6, pp.175-182, 1996. (巡航式水下載具性能設計及軌跡控制問題之探討)
9. J. Guo, F.C. Chiu, C.C. Huang, “Design of a Sliding Mode Fuzzy Controller for the Guidance and Control of an Autonomous Underwater Vehicle,” *Ocean Engineering*, Vol. 30, No.16, pp. 2137-2155, 2003. (自主式水下載具路徑控制器之設計與性能測試)
- 10.郭振華、蔡進發、許峰源、林振濱 , “具有比例-微分及滑動模式架構之水下遙控載具導航控制器設計” , *中國造船暨輪機工程學刊* , 第二十二卷第一期 , pp.45-52, 2003。(遙控水下載具路徑控制器之設計與性能測試)
- 11.J.-J. E. Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*, 1991, Prentice-Hall. (關於滑動模式及其他非線性控制方法的介紹)
- 12.D.R. Yoerger, J. G. Cooke, J.-J. E. Slotine, “The Influence of Thruster Dynamic on Underwater Vehicle Behavior and Their Incorporation Into Control System Design, ”*IEEE Journal of Ocean Engineering*, Vol.15, No.3, July 1990. (水下載具螺槳性能設計及控制問題之探討)
- 13.J. Akizono, et. al., “Future View of Advance Investiagion and Construction Work in Port Area,” Synmposium on Underwater Technology, pp. 355-362, Taipei, 2004. (日本海港及空港研究所在水下機器人應用的簡介)
- 14.H. Kondo, T. Ura, Y. Nose, “Development of an Autonomous Underwater Vehicle, Tri-Dog 1, Toward Practical Use in Shallow Water,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 13, No. 2, pp. 205-211, 2001. (自主式水下載具在水下觀測的應用構想)

- 15.邱永芳等，“蘇澳港防波堤改善工程規劃”，台灣省交通處港灣技術研究所研究報告，1997。

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-94-H2DB009

計畫名稱：水下結構物自動檢測系統研究(1/4)

執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
張順雄 副校長： 一、本計畫案目標清楚，為建立港灣構造物檢測維護與水下作業之機器人系統，並研發水下作業自動化系統。 二、本年度以系統設計與動力學分析為執行目標將完成 1. 運動模式數學。 2. 系統運動模擬計算，控制器採 P-D 控制器可控制性較大。 3. 載具系統原型之初步設計及性能分析正擬定中。 三、主持人執行經驗豐富，報告用心，值得肯定。 四、載具系統原型設計宜再調查國外相關 Lab 之設計比較作為參考。	感謝委員的評論。期末報告中，將調查國外相關實驗室之設計成果，以做為本計畫載具系統原型設計之參考。	依處理情形辦理。
林顯群 教授： 本研究案為期 4 年，目標在開發一無人之水下載具以供港灣構造物之檢測維護。研究內容包含“水下作業用機器人實驗系統”、“導航控制”、“影像處理”與“人機介面設計”等多	感謝委員的評論 本研究將注意進度之掌控，以順利完成計畫目標。	依處理情形辦理。

項課題 本年度(94 年)之預定工作為系統設計與動力學分析。其重點在於“運動數學模式建立”、“載具系統之初步設計與分析”及“模擬計算程式之選定與試算”，依目前之期中報告內容看來，已大致完成前二項，故本人以為目前之研究進度與成果十分令人滿意，應可以順利執行完成本年度之目標。		
吳文榕 教授： 一、水流二節的設計是否符合要求？ 二、載具的外型為何？ 三、四個螺槳的位置為何？是否會影響載具的功能？ 四、建議將各項規格定義清楚。	一、考慮港灣內作業的方便性,載具的大小及重量以方便由兩人操作為前提。根據二節的水流限制可以訂出每具推進器馬達規格約為 1hp。此一規格符合載具大小及重量的設定,因此載具不適於在超過二節水流的情況下工作。 二、外型暫訂為由一組框架所組成的立方體。 三、四個螺槳需提供三個自由度的直線運動,及水平面上的旋轉運動。因此最合理之分佈為置放於框架四周,與垂直面平行且與水平面呈一傾斜角。 四、將在期末報告中進一步詳訂規格	一、依處理情形辦理。 二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。 四、依處理情形辦理。
邱永芳 主任： 一、水下載具針對水下量測的能力應有事先規畫。	一、本計畫所規劃的水下載具，其主要量測工作為記錄水下結構物表面的情況。使用的儀器為水	一、依處理情形辦理。

二、水下載具應具有定位功能。 三、水下載具推動力之設計可行性。	下攝影機及聲納測距儀。載具在量測時，需與結構物表面保持固定距離，利用等速運動，水平及垂直交互掃瞄結構物之表面，並製作影像紀錄，將水下大範圍的表面影像儲存成單一檔案，以供維修人員參考。 二、水下載具使用都卜勒聲納，藉由量測與海底相對運動，可以推算出位置。所推算的位置誤差，必須在浮上水面時，與 GPS 量測資料相比對做修正。 三、水下載具的推進力設計原則，是使用四具螺槳共同作用，以產生空間三維度的推力，以及水平面的旋轉力矩。水平面維度所能得到的力量大小需能抗衡二節的平面水流。	二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。
何良勝 科長： 一、建議於期末報告中，增列介紹國內外已有之相關設備。 二、依據本系統設備未來可能從事之工作，例如施工、測量或打撈等，其可否承載相關工作之器材。 三、於第三章之動力學數學模型分析中，是否有考量實	一、期末報告中將增列國內外已有相關設備之簡介。 二、本系統提供的是一個能被定位、控制的工作平台。在未來若有施工、測量、打撈等任務，必須視相關工具的界面是否與載具電腦相容，以及工具的重量、大小、功率等是否與載具所能承載之規格相符。 三、由於動力學數學模型在設計控制器時通常需被	一、依處理情形辦理。 二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。

際海象條件(如波浪、海流)？	簡化，以符合實時運算的限制。海象條件，如波浪、海流等，在載具系統上沒有實時數據可供控制器使用，因此在數學模式中被視為未知之外力，但假設其具有一上限，只要載具之推力足以克服此最大外力，即可達到控制目標。	
蔡立宏 研究員： 一、建議無人水下載具的設備配置圖，能更加明確，如螺槳位置。 二、無人載具很重要是能精確簡易操作，建議增加預計操作方法之說明，以及預估可能的操作誤差多少？ 三、建議增加國內外已發展類似的技術，以及與本研究所發展載具有何差異性。	一、期末報告中將會就載具的設備配置做較詳細的定義及說明。 二、期末報告中將就載具的操作方法提出說明。載具使用遙控模式，由操作人員用搖桿操縱，也可以使用自動控制模式，根據定位系統的回授位置做控制標準。在自動控制模式下，定位誤差受到量測系統之雜訊、動力學模式之誤差等因素影響，操作誤差的大小必須根據真實系統之行為來評估。 三、期末報告中將就現有的技術，以及與本研究所發展載具之差異性提出說明。	一、依處理情形辦理。 二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。

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-94-H2DB009

計畫名稱：水下結構物自動檢測系統研究(1/4)

執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
張順雄 副校長： 一、計畫符合第一年期程工作，建立運動數學模式，並探討其控制系統之穩定性。內容以模擬做初步試算，且究載具系統原型有初步設計工作。 二、第四章 P4-14 頁圖 4-12。是否為誤植，另建議路徑追蹤及洋流影響多做一、二個例子以資參考，並請在圖說中略加說明。 三、本研究案建議可在第一章部分加入文獻調查或比較以符合期末報告統整之意。	一、感謝委員的評論。 二、第四章 P4-14 頁圖 4-12 已修正為圖 4-11。期末報告已根據建議，加入路徑控制及洋流影響之模擬例，並在圖說中說明。 三、根據審查委員意見，在第一章部分加入文獻調查。	一、符合。 二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。
林顯群 教授： 一、本年度之工作項目與預期目標皆已完成並列於報告書中，主持人之努力值得肯定，第二年計畫之成果值得期待。 二、規畫中之螺槳外型是未來水下機器人系統之主要動力來源，其設計是否能提供足夠的推力，為日後整	一、感謝委員的評論。本研究將注意進度之掌控，以順利完成計畫目標。 二、螺槳推力特性為控制性能好壞的主要因素，本計畫的載具控制方法即根據螺槳靜止下之推力	一、符合。 二、依處理情形辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
個系統之成敗重點。 1. 如能深入了解螺槳設計，應可確保其推力足夠。 2. 如能進行 CFD(電腦流場分析)模擬則可以減少測試失敗之風險，並找出較佳之螺槳設計、大小與位置安排。	特性，求出最適合之推力控制邏輯。至於螺槳葉片之設計課題，因已超出本計畫的範圍，希望未來再針對此題目，做更深入的研究。本計畫擬使用現成的螺槳設計，採用文獻中已經被廣泛採用的配置模式，配合控制器的運算，來達到理想的推力控制。	
吳文榕 教授： 一、本年度的計畫重點在於建立水下載具之運動數學模式並發展設計其原型，計畫執行的結果已經成功的達成此目標。 二、主持人在此研究領域經驗豐富，計畫執行認真負責，成果令人滿意值得鼓勵。 三、控制器的參數照原始的想法是到操作現場由人為的調整，可不可能有一演算法自動的調整這些參數。 四、水下載具如長時間的操作，控制器的誤差是否會累積，要如何校正？	一、感謝委員的評論。本研究將注意進度之掌控，以順利完成計畫目標。 二、感謝委員的評論。 三、控制器參數的適應性調整方法。因牽涉到控制系統穩定性的課題，將在現場人為調整確認其性能之後，做為下一階段控制器設計的目標之一。 四、由於使用速度資訊做為導航的主要資料，因此水下載具經過長時間的操作，位置的誤差會累積，必須在浮出水面後將誤差歸零。但因防波堤水下結構物之檢視操作時間，每具沉箱只需約 20 分鐘，因此誤差的	一、符合。 二、符合。 三、依處理情形辦理。 四、依處理情形辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
	累積可以即時藉由歸零的操作消除，不會造成過大的定位誤差。	
何良勝 科長： 一、研究結果符合預期工作成果。 二、請增加說明摘要與結論部分，並於結論中增列建議說明。 三、有關文內部分，以下建議增列說明： 1. 表 2.2 表 2.4 中增加中文說明。 2. 部分方程式之符號建議請增加說明。 3. 4.3 節之系統模擬，增列系統之整體圖示說明。	一、感謝委員的評論。 二、期末報告中增列摘要與結論部分並於結論中增列建議說明。 三、期末報告內文部份依據審查委員建議增列所需說明及系統整體圖示。	一、符合。 二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。
蔡立宏 研究員： 一、表 2.2 表 2.4 中請增加中文說明。 二、P4-14 文章中圖 4-12 應改為 4-11。 三、P5-3 文獻[13]建議增加研究成果說明。 四、水下載具設計是否考量工作位置接近水面時，受波浪水流影響。	一、期末報告中依據審查委員建議增列所需中文說明及修正文字。 二、期末報告中依據審查委員建議增列所需中文說明及修正文字。 三、期末報告中將文獻[13]之主要內容整理說明。 四、水下載具再接近水面時受到波浪及水流之影響，可以將此外力視為干擾，其效果將造成控制的位置誤差，此誤差可以藉由螺槳施加的推進力消除。因此螺槳的	一、依處理情形辦理。 二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。 四、依處理情形辦理。

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
	推力若能克服海流波浪的外力，即可達到定位的目的。本計畫考慮港灣內作業的方便性，載具的大小及重量以方便由兩人操作為前提。根據二節的水流限制可以訂出每具推進器馬達規格約為 1hp。此一規格符合載具大小及重量的設定，因此載具不適於在超過二節水流情況下工作。	

附錄三 期中簡報資料

交通部運輸研究所合作研究計畫: 水下結構物自動檢測系統研究(1/4) 期中報告

報告人：郭振華

國立台灣大學工程科學及海洋工程學系

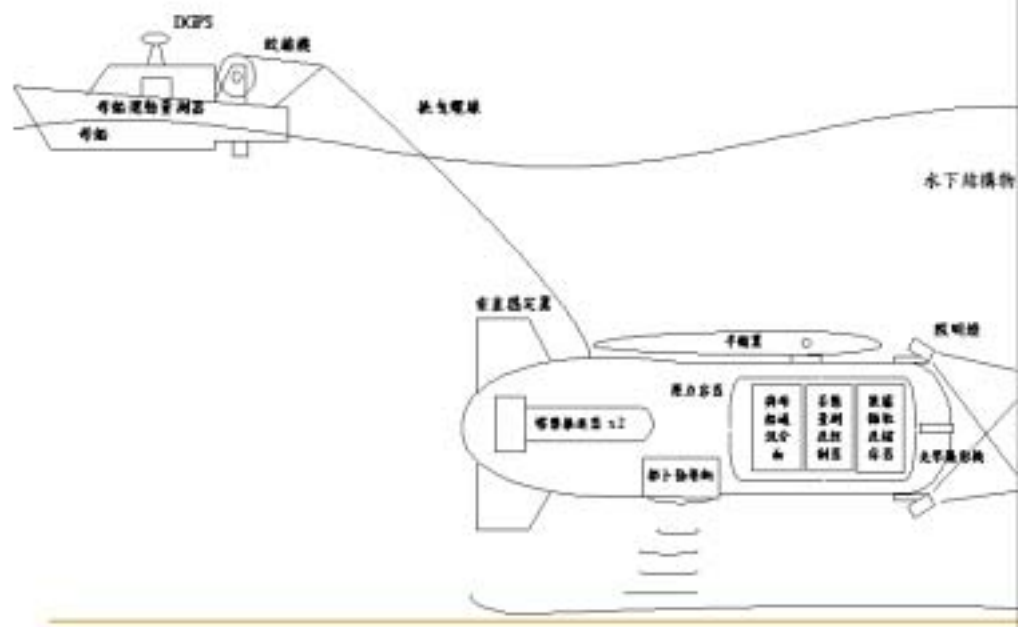
報告大綱

- 研究目的
- 系統規劃
- 動力學模型及控制器設計
- 結語

研究目的

- 設計適用於港灣構造物檢測、維護、與港灣水下施工的機器人系統。
- 建立水下作業用機器人實驗系統，累積系統研究、系統設計的關鍵技術。
- 內容包含水下機器人系統設計規劃及製作、導航控制、影像處理方法、及人機介面之設計等。

設計構想



研究內容規劃（全程）

1. **94年度：系統設計與動力學分析**
 - 內容：a. 建立載具的動力學分析與載具系統設計所需關鍵工具。
b. 水下機器人本體初步設計
 2. **95年度：控制方法與模擬驗證**
 - 內容：a. 建立載具深度與姿勢控制的理論方法，並藉由模擬予以驗證。b. 水下機器人本體設計與製作
 3. **96年度：原型設計、整合與水槽測試**
 - 內容：包含電纜及酬載儀器在內的全系統原型設計、軟硬體整合與水槽測試。
 4. **97年度：海域測試與觀測方法之研究**
 - 內容：包含電纜及酬載儀器在內的全系統原型設計、軟硬體整合與港灣防波堤堤趾檢視程序之建立。
-

研究步驟（第一年）

步驟1. 運動數學模式之建立

- 數學模式包含載具及控制螺槳在內為一整體之載具系統，描述其運動數學模式。並根據數學模式建立載具之運動控制器，確立控制系統的穩定性。

步驟2. 系統運動模擬計算程式之撰寫與試算

- 依循步驟1所建構之數學模式，撰寫載具系統運動模擬計算程式並做初步試算與確認。

步驟3. 載具系統原型的初步設計與性能分析

- 依據步驟2探討的結果，採用適宜之外形尺寸以進行系統原型的初步設計，並進行外殼、支架之製作組裝。
-

研究課題（第一年）

- 剛體運動方程式之推導

包含重力及浮力; 慣性流體力; 黏滯力; 螺槳推力之推導

- 流體力係數估算方法

- 載具初步設計

系統規劃

組成之元件及次系統包含:

- 載具本體結構(支架、浮力材、機械轉盤、螺槳、控制筒);
 - 感測元件(都卜勒聲納、影像聲納、光學攝影機);
 - 導航控制電腦;
 - 人機界面;
 - 支援次系統(纜線、電源供應器、纜線車架);
-

設計規格

項目	規格
外型尺寸	0.9m(L)×0.6m(W)×0.6m(H)
重量	40kg空氣中重量
操作深度	100 m
航速	最大0.8 m/s
配重	3 kg (可調整)
推進器	4×1 hp
電動機械轉盤	1個
感測元件	視訊攝影機、影像聲納
導航元件	都卜勒聲納
支援系統	電源：110VAC, 50/60 Hz, 10 Amps ：220VAC, 50/60 Hz, 20 Amps 交直流電源供應器：1個 運輸：小型工作船或吊車

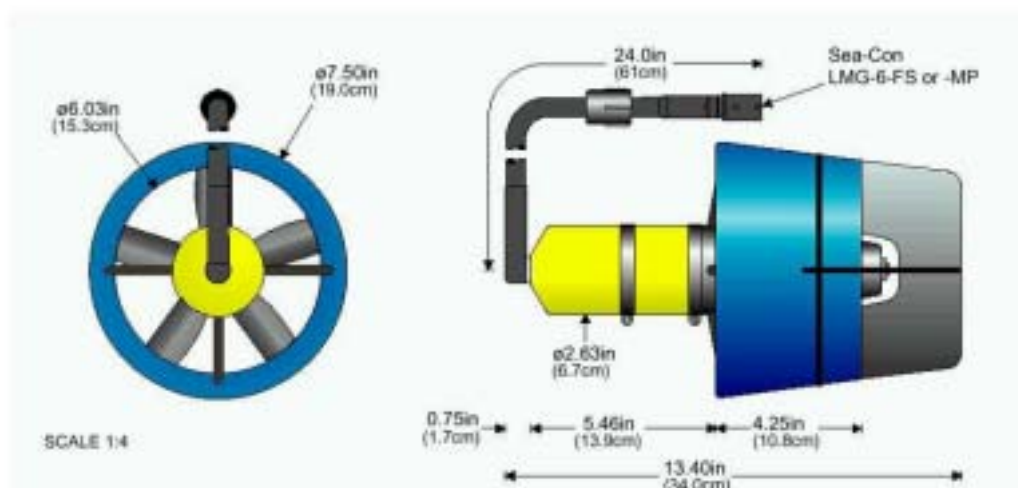
都卜勒聲納



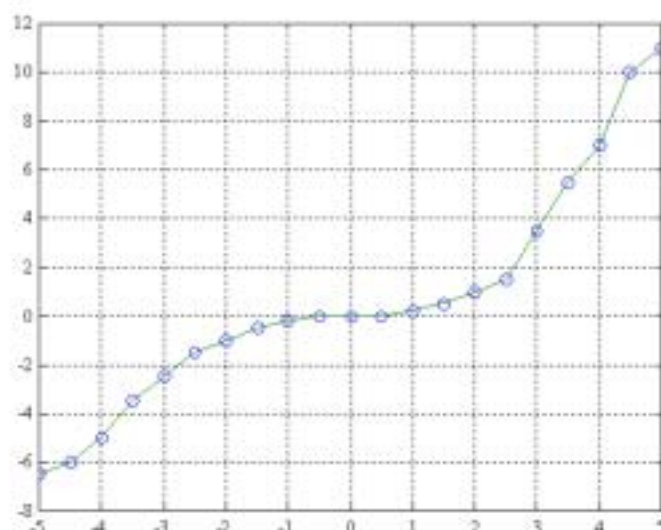
都卜勒聲納



螺槳外型尺寸



螺旋推力曲線



螺旋推力分配

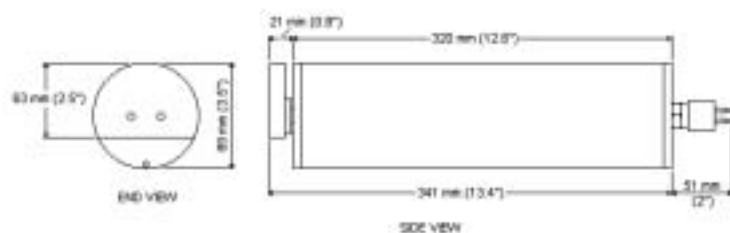
水平面推力分配公式

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ L1 & -L2 & L3 & -L4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F1 \\ F2 \\ F3 \\ F4 \end{bmatrix} \quad \text{或} \quad \mathbf{Y} = \mathbf{AX}$$

求解最佳化函數 J 的最小值，
可以解出各螺旋應負責的推力

$$J = |\mathbf{X}^T \mathbf{X}| + \lambda^T |\mathbf{Y} - \mathbf{AX}|$$

影像聲納



Frequency	675kHz
Transducer Beam	10 degrees
Range	150 meters max.
Sector	0 to 180 degrees
Resolution	4,8,14bits
Weight	1.5 kg in water
Operating Power	22-48DC @1Amp

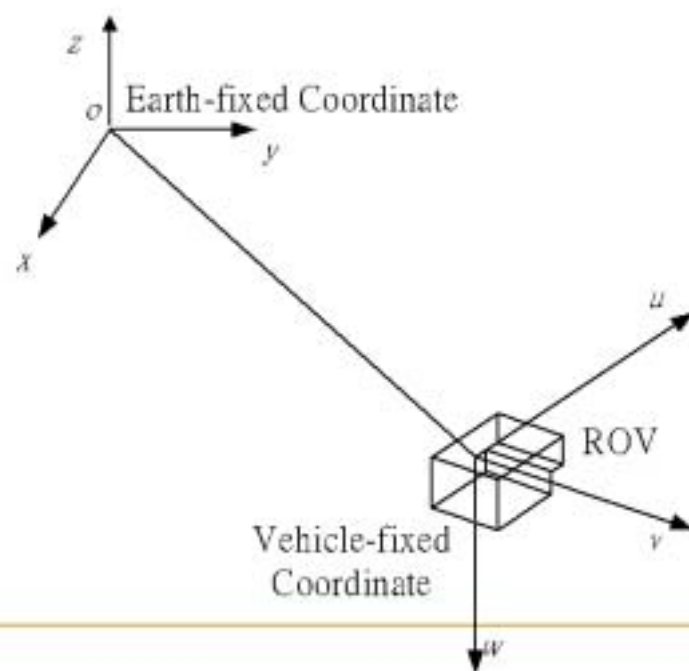
光學攝影機



動力學模型及控制器設計

數學模式包含載具及控制螺槳在內之載具系統，描述其運動數學模式。並根據數學模式建立載具之運動控制器，確立控制系統的穩定性。

座標系



姿態誤差向量

$$\mathbf{p}_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \psi_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi_c & \sin\psi_c & 0 & 0 \\ -\sin\psi_c & \cos\psi_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_c) = \mathbf{T}_e (\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_c)$$

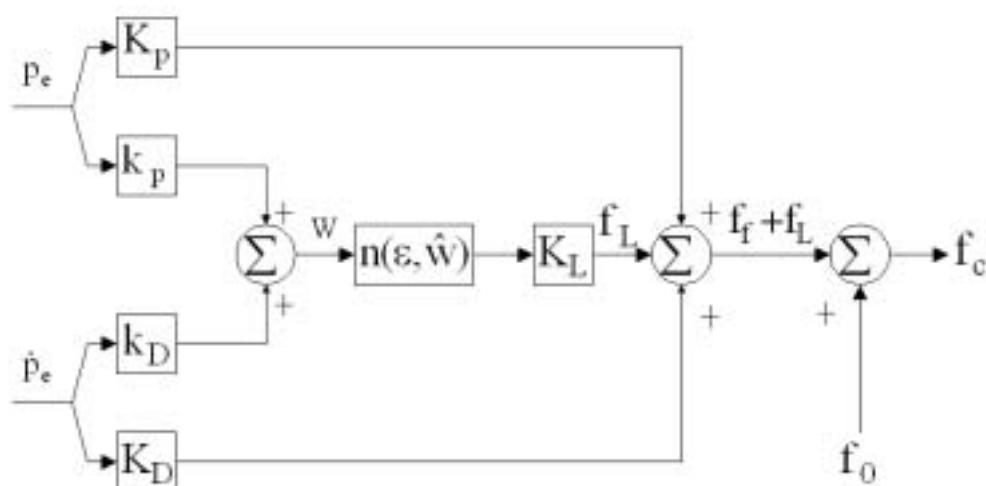
載具數學模型

$$\mathbf{f}_0 = \mathbf{M}_0 \ddot{\mathbf{p}}_c - \mathbf{C}_0 \dot{\mathbf{p}}_c - \mathbf{D}_0 \dot{\mathbf{p}}_c - \mathbf{t}_0 - \mathbf{g}_0$$

各自由度的耦合程度視為微量的干擾。

省去耦合項後，簡化的單自由度載具運動模式可以做為控制器設計的基礎。

運動控制器



控制器設計方法

- 載具回授項由P-D(比例-微分)控制法所構成。P-D控制器提供良好的阻尼，改善系統時域的暫態響應，但是對於穩態並無改善作用。
- 誤差補償項由一飽和函數構成。在誤差很小時，補償項沒有作用。在誤差大時，可將誤差量強迫收斂，用來消除因為系統動態的非線性及不確定性所造成的載具控制誤差量，可以改善穩態誤差。

利用誤差函數的收斂性質可保證穩定性

誤差函數： $V(e) = \frac{1}{2}e^T P e$ $P = \begin{bmatrix} k_L & k_p \\ k_p & k_D \end{bmatrix}$

收斂性質：

(1) $c_1 e^2 \leq V(e) \leq c_2 e^2$ $c_1, c_2 > 0$

(2) $\dot{V}(e) \leq -2\alpha[V(e) - V^*]$ $V(e) > V^*$

控制系統性能

控制誤差：

- 載具模式的不確定性。
- 螺旋槳馬達的推力誤差。
- 感測器的雜訊。

收斂速度：

- 各自由度追蹤誤差量呈指數函數的型態收斂，並且趨近於一個常數。
-

控制器在設計上的優點

- 本計畫所發展的運動控制方式為一穩定的控制器。
- 可以獲得與系統性能參數與 P-D 及控制增益之關係式，以簡單地決定出這些關鍵的控制增益，在控制器的設計上，能夠提供設計者一個方便有效的設計方法。

結論

- 本期中報告已完成運動數學模式之建立，載具系統的初步規劃。
- 下半期計畫將執行運動模擬計算程式之撰寫，以及載具系統的初步設計與性能分析。

附錄四 期末簡報資料

交通部運輸研究所合作研究計畫: 水下結構物自動檢測系統研究(1/4) 期末報告

報告人：郭振華

國立台灣大學工程科學及海洋工程學系

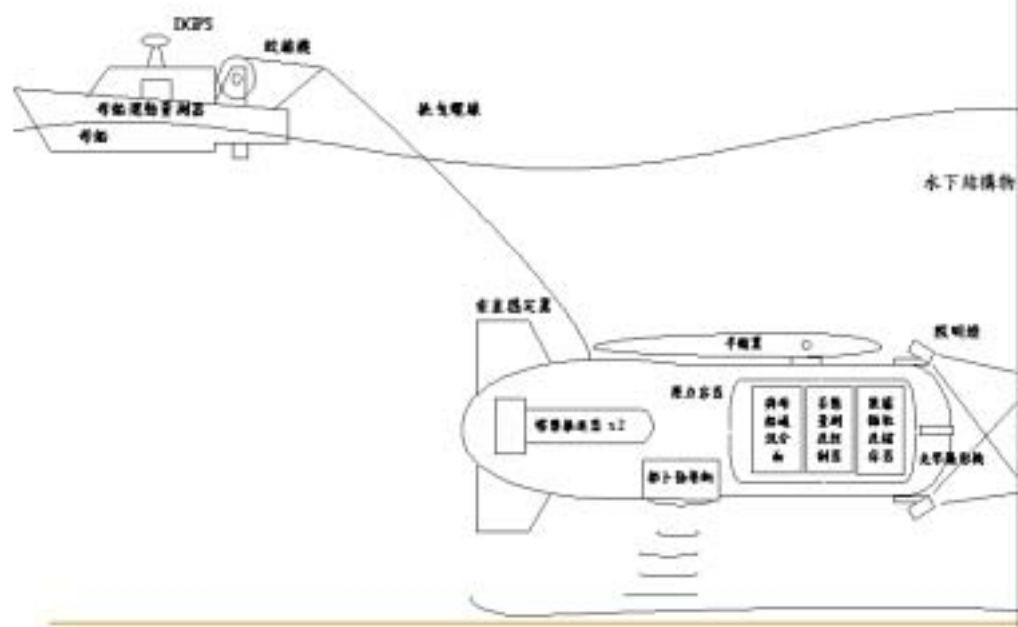
報告大綱

- 研究目的
- 載具系統規劃
- 動力學模型及控制器設計
- 運動模擬
- 作業系統規劃
- 結語

研究目的

- 設計適用於港灣構造物檢測、維護、與港灣水下施工的機器人系統。
- 建立水下作業用機器人實驗系統，累積系統研究、系統設計的關鍵技術。
- 內容包含水下機器人系統設計規劃及製作、導航控制、影像處理方法、及人機介面之設計等。

設計構想



研究內容規劃（全程）

1. **94年度：系統設計與動力學分析**
 - 內容：a. 建立載具的動力學分析與載具系統設計所需關鍵工具。
b. 水下機器人本體初步設計
 2. **95年度：控制方法與模擬驗證**
 - 內容：a. 建立載具深度與姿勢控制的理論方法，並藉由模擬予以驗證。b. 水下機器人本體設計與製作
 3. **96年度：原型設計、整合與水槽測試**
 - 內容：包含電纜及酬載儀器在內的全系統原型設計、軟硬體整合與水槽測試。
 4. **97年度：海域測試與觀測方法之研究**
 - 內容：包含電纜及酬載儀器在內的全系統原型設計、軟硬體整合與港灣防波堤堤趾檢視程序之建立。
-

研究步驟（第一年）

步驟1. 運動數學模式之建立

- 數學模式包含載具及控制螺槳在內為一整體之載具系統，描述其運動數學模式。並根據數學模式建立載具之運動控制器，確立控制系統的穩定性。

步驟2. 系統運動模擬計算程式之撰寫與試算

- 依循步驟1所建構之數學模式，撰寫載具系統運動模擬計算程式並做初步試算與確認。

步驟3. 載具系統原型的初步設計與性能分析

- 依據步驟2探討的結果，採用適宜之外形尺寸以進行系統原型的初步設計，並進行外殼、支架之製作組裝。
-

研究課題（第一年）

- 剛體運動方程式之推導
包含重力及浮力; 慣性流體力; 黏滯力; 螺槳推力之推導
 - 控制系統模擬
 - 載具初步設計
-

系統規劃

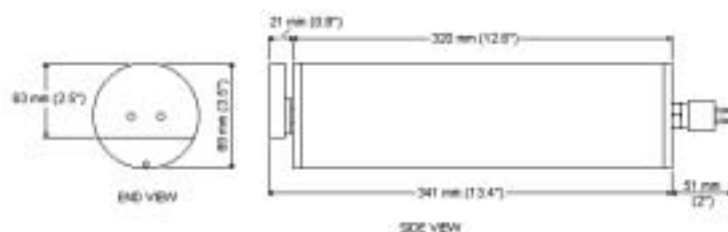
組成之元件及次系統包含:

- 載具本體結構(支架、浮力材、機械轉盤、螺槳、控制筒);
 - 感測元件(都卜勒聲納、影像聲納、光學攝影機);
 - 導航控制電腦;
 - 人機界面;
 - 支援次系統(纜線、電源供應器、纜線車架);
-

設計規格

項目	規格
外型尺寸	0.9m(L)×0.6m(W)×0.6m(H)
重量	40kg空氣中重量
操作深度	100 m
航速	最大0.8 m/s
配重	3 kg (可調整)
推進器	4×1 hp
電動機械轉盤	1個
感測元件	視訊攝影機、影像聲納
導航元件	都卜勒聲納
支援系統	電源：110VAC, 50/60 Hz, 10 Amps ：220VAC, 50/60 Hz, 20 Amps 交直流電源供應器：1個 運輸：小型工作船或吊車

影像聲納



Frequency	675kHz
Transducer Beam	10 degrees
Range	150 meters max.
Sector	0 to 180 degrees
Resolution	4,8,14bits
Weight	1.5 kg in water
Operating Power	22-48DC @1Amp

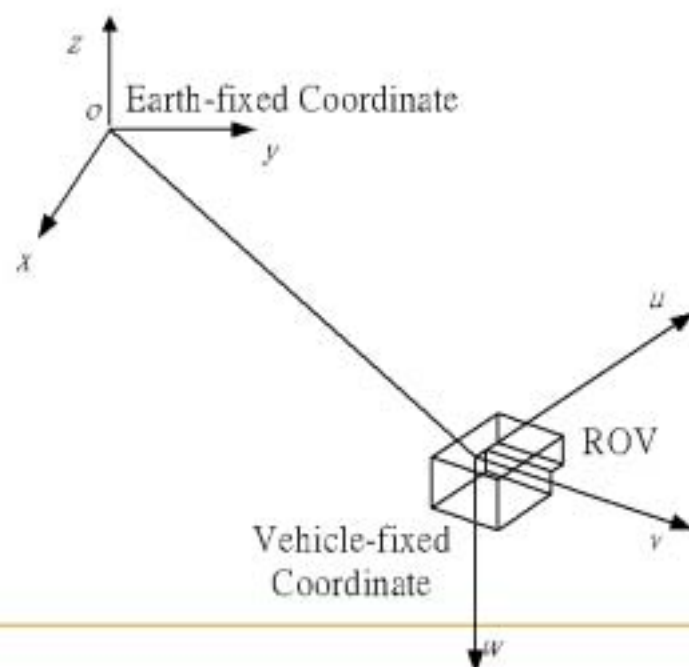
光學攝影機



動力學模型及控制器設計

數學模式包含載具及控制螺槳在內之載具系統，描述其運動數學模式。並根據數學模式建立載具之運動控制器，確立控制系統的穩定性。

座標系



姿態誤差向量

$$\mathbf{p}_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \psi_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_c & \sin \psi_c & 0 & 0 \\ -\sin \psi_c & \cos \psi_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_c) = \mathbf{T}_e (\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_c)$$

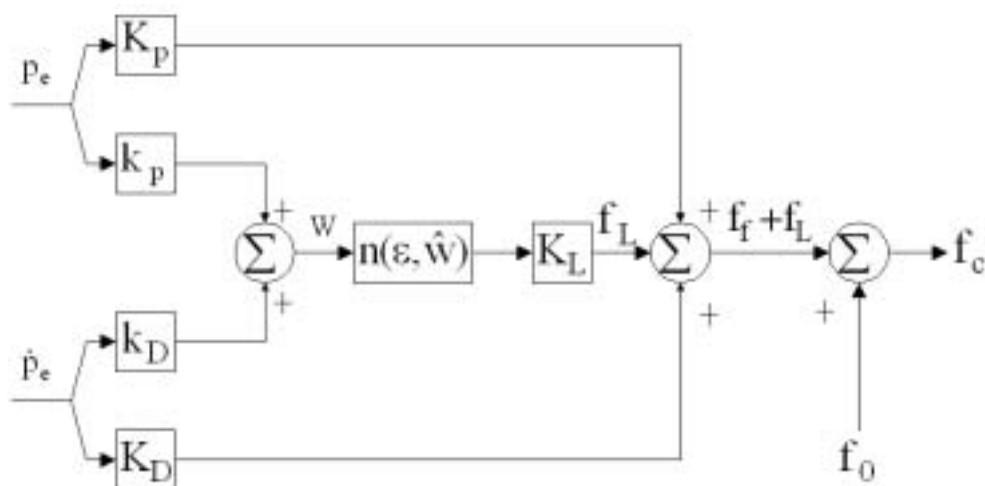
載具數學模型

$$\mathbf{f}_0 = \mathbf{M}_0 \ddot{\mathbf{p}}_c - \mathbf{C}_0 \dot{\mathbf{p}}_c - \mathbf{D}_0 \dot{\mathbf{p}}_c - \mathbf{t}_0 - \mathbf{g}_0$$

各自由度的耦合程度視為微量的干擾。

省去耦合項後，簡化的單自由度載具運動模式可以做為控制器設計的基礎。

運動控制器



控制器設計方法

- 載具回授項由P-D(比例-微分)控制法所構成。P-D控制器提供良好的阻尼，改善系統時域的暫態響應，但是對於穩態並無改善作用。
 - 誤差補償項由一飽和函數構成。在誤差很小時，補償項沒有作用。在誤差大時，可將誤差量強迫收斂，用來消除因為系統動態的非線性及不確定性所造成的載具控制誤差量，可以改善穩態誤差。
-

利用誤差函數的收斂性質可保證穩定性

誤差函數： $V(e) = \frac{1}{2}e^T P e$ $P = \begin{bmatrix} k_L & k_p \\ k_p & k_D \end{bmatrix}$

收斂性質：

$$(1) \quad c_1 e^2 \leq V(e) \leq c_2 e^2 \quad c_1, c_2 > 0$$

$$(2) \quad \dot{V}(e) \leq -2\alpha[V(e) - V^*] \quad V(e) > V^*$$

控制器在設計上的優點

- 本計畫所發展的運動控制方式為一穩定的控制器。
 - 可以獲得與系統性能參數與 **P-D** 及控制增益之關係式，以簡單地決定出這些關鍵的控制增益，在控制器的設計上，能夠提供設計者一個方便有效的設計方法。
-

控制器在設計上的優點

- 本計畫所發展的運動控制方式為一穩定的控制器。
 - 可以獲得與系統性能參數與 **P-D** 及控制增益之關係式，以簡單地決定出這些關鍵的控制增益，在控制器的設計上，能夠提供設計者一個方便有效的設計方法。
-

載具製作一 攝影機轉動機構



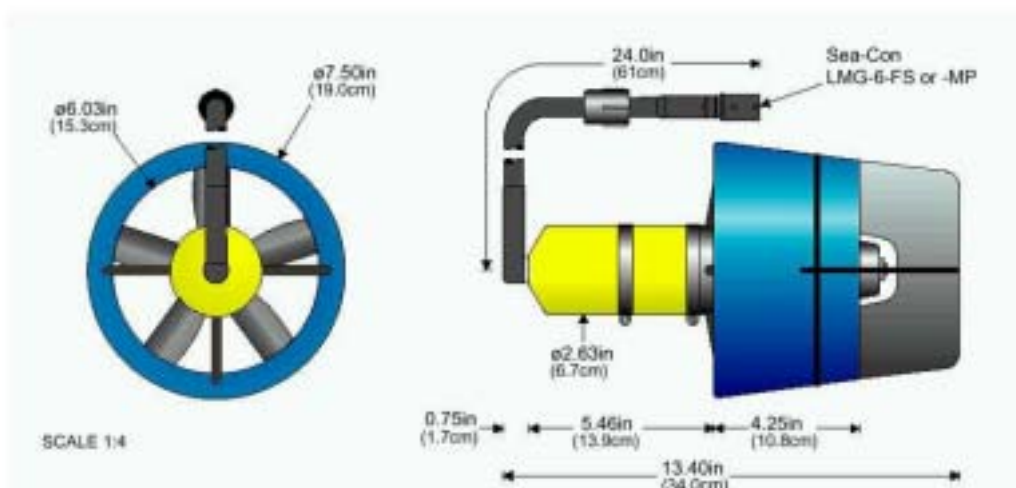
載具製作一 運動控制元件



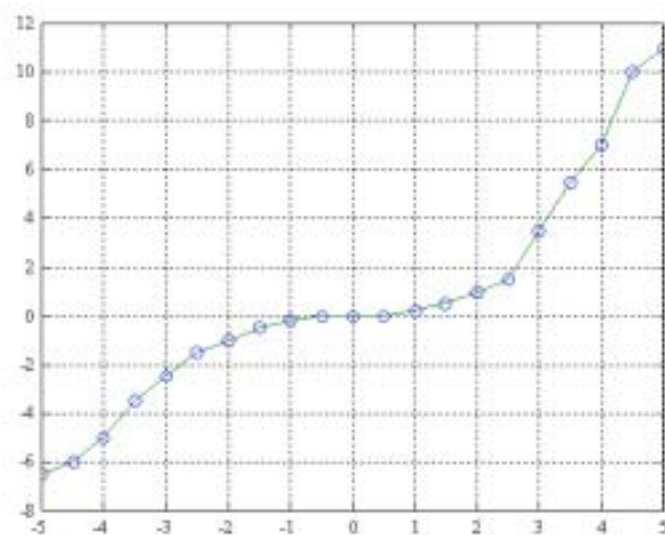
載具製作— 水下開關及載具支架



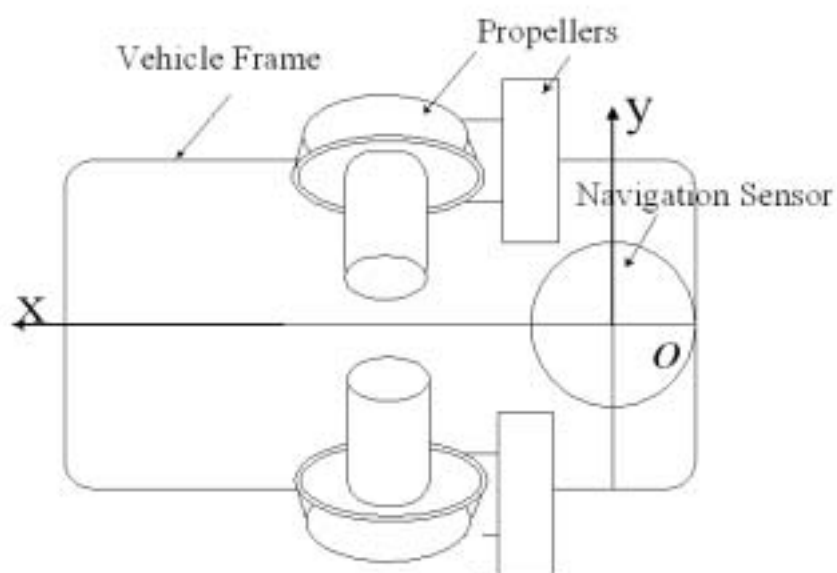
螺槳外型尺寸



螺槳推力曲線



螺槳配置



螺旋槳推力分配

水平面推力分配公式

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ L_1 & -L_2 & L_3 & -L_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \quad \text{或} \quad \mathbf{Y} = \mathbf{AX}$$

求解最佳化函數 J 的最小值，
可以解出各螺旋槳應負責的推力

$$J = |\mathbf{X}^T \mathbf{X}| + \lambda^T |\mathbf{Y} - \mathbf{AX}|$$

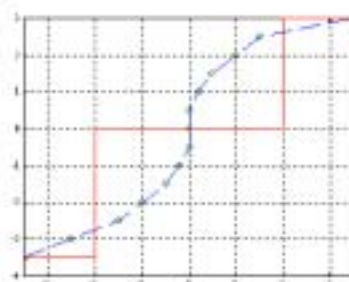
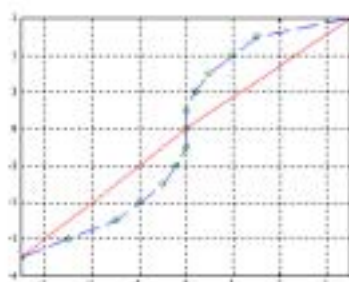
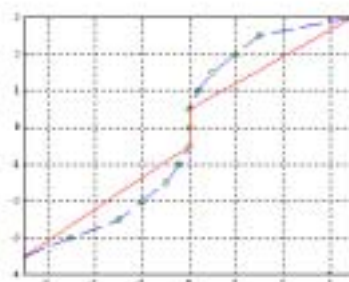
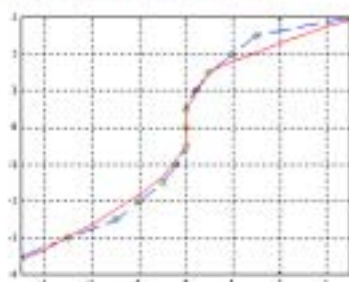
系統模擬

$$\begin{bmatrix} m_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u|u| \\ v|v| \\ r|r| \\ w|w| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \\ F_z \end{bmatrix}$$

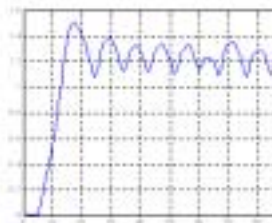
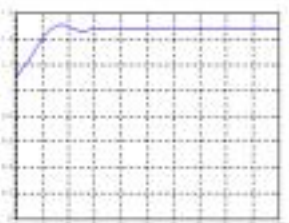
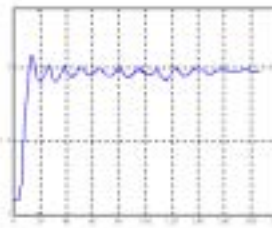
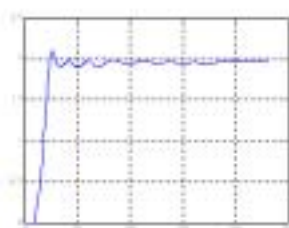
各運動方向之模式參數

運動方向	質量 ($\text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$) 或轉動慣量 ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$)	直線運動阻尼 係數 ($\text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$) 或轉動阻尼係 數 ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$)
前進縱移	10	20
後退縱移	10	25
右向橫移	50	35
左向橫移	50	30
左旋平擺	7	5
右旋平擺	7	5
垂直向上	55	20
垂直向下	55	20

n函數設計



n 函數設計

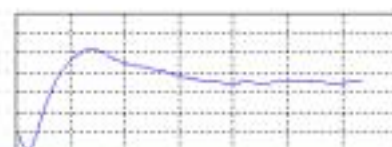
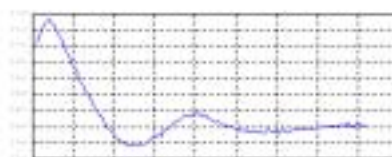


n 函數設計

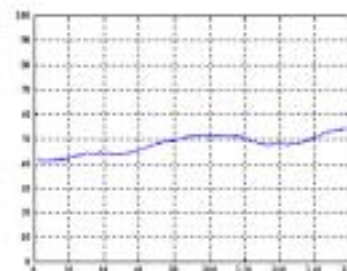
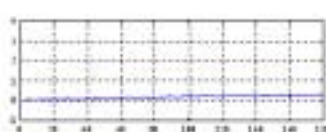
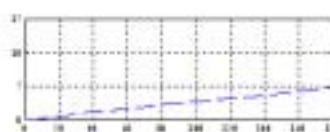
- 函數曲線和螺槳性能曲線相近，其所得到的控制效果最佳。
- 在補償電壓值之調整上，因載具本身略輕於水，當函數和螺槳性能曲線極為相似時，其補償電壓值之調整只須在零點做小部份之調整即可。

目標點追蹤

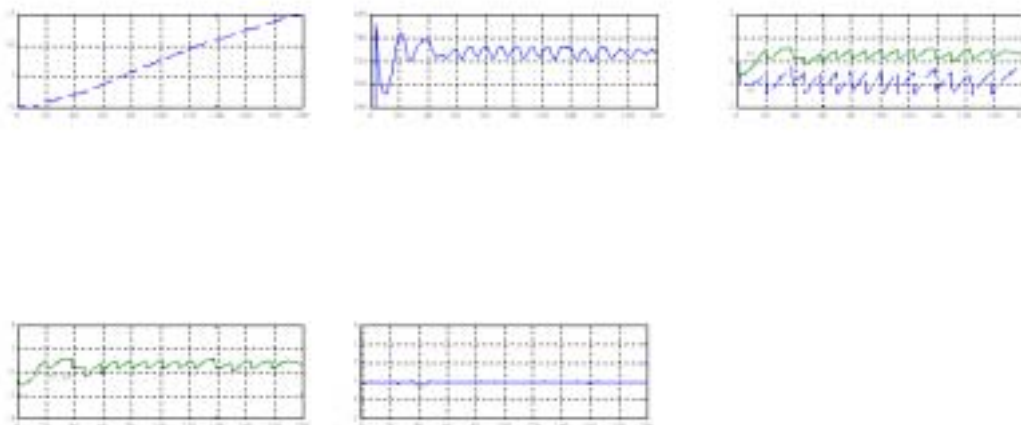
- 角度追蹤實驗: 給定一個角度(340度), 讓載具只有旋轉運動, 測試載具是否能夠收斂。
- 點追蹤實驗: 目標點距離載具為 $x=2$ 公尺, $y=0.5$ 公尺, 測試位置誤差是否收斂。



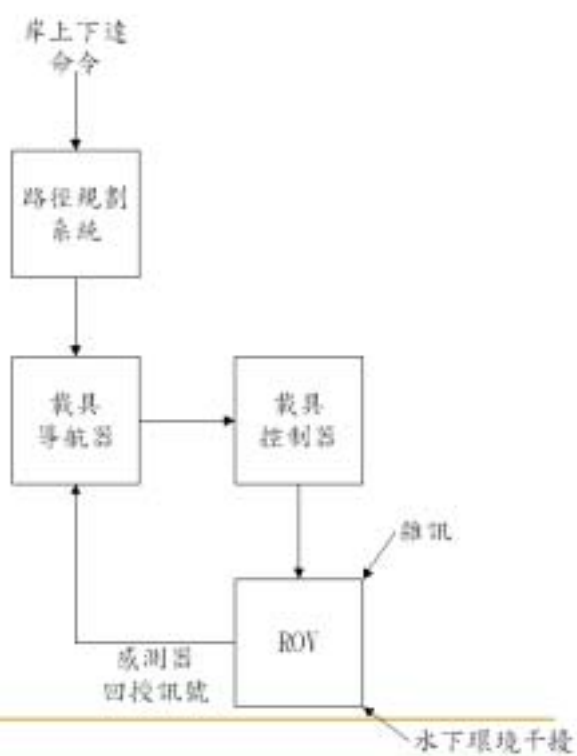
洋流下的控制模擬



路徑追蹤



導航及運動 控制架構

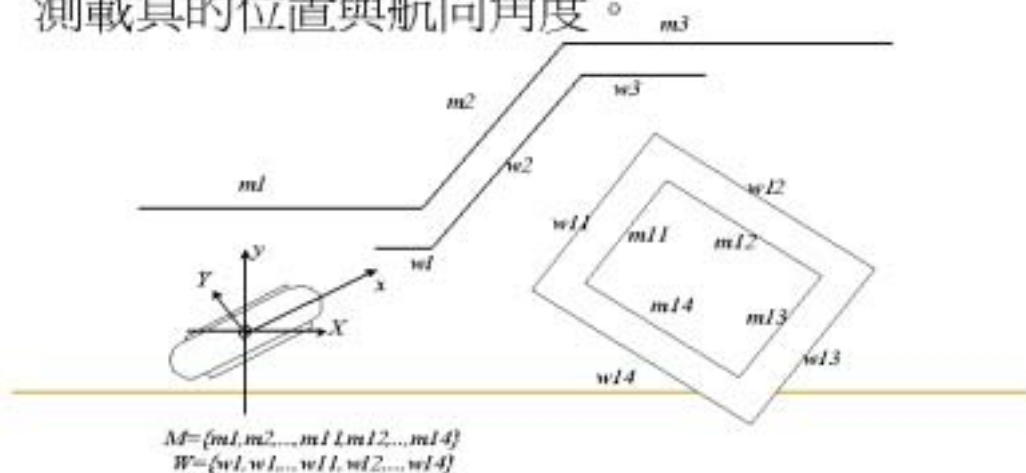


感測器訊號整合



水下檢測任務規劃

使用導航及控制方法，將載具帶領至正確位置，施行水下攝影等工作。狀態估測器利用載具所攜帶的感測器，以及環境的地圖，估測載具的位置與航向角度。



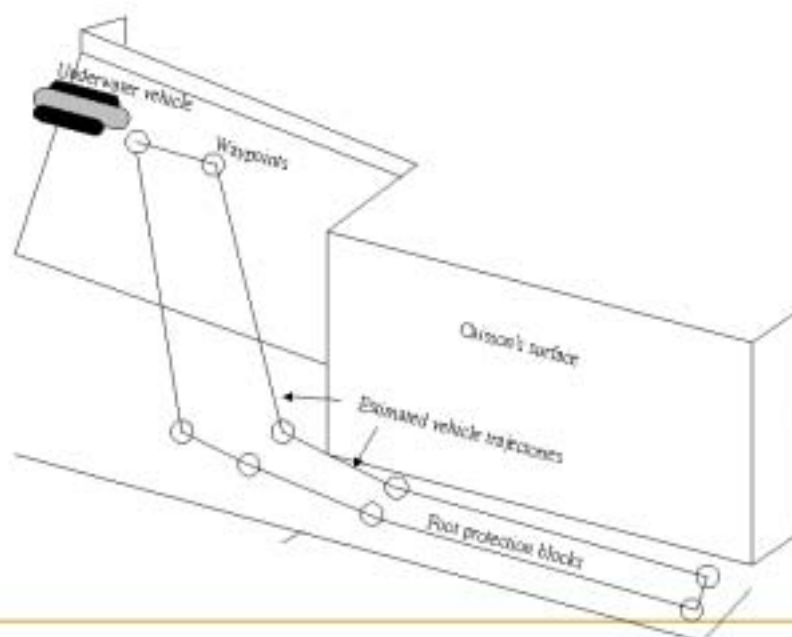
防波堤沈箱之水下觀測

觀測任務：

拋石觀測：載具以等速度，沿著沈箱表面，以距離拋石面等深度之姿態航行，航行過程以視訊攝影方式取得拋石基礎的影像。

沈箱面觀測：以一次觀測一座沈箱為原則，載具以等深度沿著沈箱表面航行，到達一端後，改變深度，沿沈箱表面回到起始端。經過多次的不同深度觀測結果，可以整合出整體沈箱表面的影像資料。

觀測任務示意圖



國外相關研究成果

Length over all	1.85m
Breadth over all	0.58m
Depth	0.53m (0.90m include antennas)
Dry weight	170kg
Operating depth	100m max
Maximum speed	2knots
Duration	2hours
Structures	Aluminum Pressure Hulls (Main Cylinder x1, Battery Cylinder x2)
Actuators	100W Thrusters x6 (Rotation, Amp. feed back)
Processors	Intel Pentium MMX 233MHz x3 (High Level, Low Level, Vision) Attitude and Heading Reference System Doppler Velocity Log
Sensors	Electromagnetic Flow Meter Pressure Sensor (Depth Sensor) Real Time Kinematics GPS Acoustic Ranging Sensor x8 CCD Camera with Pan & Tilt Mechanism
Communications	Transponder Wireless LAN 430MHz Wireless Modem for RTK-GPS
Lights	24W Arc Lamp x2
Batteries	25.2V Ni-Cd Battery 20Ah x4



資料由Ura Lab提供

結論

- 本期報告已完成運動數學模式之建立、載具系統的初步規劃、運動模擬計算程式之撰寫，以及載具支架及夾具等的設計與製作。
- 未來目標是完成載具之組裝、測試，水下結構物觀測任務之規劃與執行，以及水下結構物影像數據之處理。