

96-74-7288
MOTC-IOT-95-H2DB009

水下結構物自動檢測系統研究 (2/4)



交通部運輸研究所
中華民國 96 年 5 月

96-74-7288
MOTC-IOT-95-H2DB009

水下結構物自動檢測系統研究 (2/4)

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 96 年 5 月

96

水下結構物自動檢測系統研究
(2/4)

交通部運輸研究所

GPN : 1009601224

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. (2/4) / 邱永芳
等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所,
民 96

面 : 公分

參考書目:面

ISBN 978-986-00-9743-6(平裝)

1. 水下工程 - 管理 - 自動化 2. 機械人

443. 029

96009037

水下結構物自動檢測系統研究 (2/4)

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 96 年 5 月

印 刷 者：承亞興企業有限公司

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：1009601224

ISBN：978-986-00-9743-6 (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 (2/4)			
國際標準書號 (或叢刊號) 978-986-00-9743-6 (平裝)	政府出版品統一編號 1009601224	運輸研究所出版品編號 96-74-7288	計畫編號 95-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 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 地址：臺北市羅斯福路 4 段 1 號 聯絡電話：02-33665739	
研究期間 自 95 年 03 月 至 95 年 11 月			
關鍵詞：水下機器人；載具；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。本報告為計畫第二年期之報告。本報告建立載具螺槳推力之分配方式，用以控制載具之縱移、橫移、平擺及起伏等運動。本報告也提出利用載具導航感測器之運動量測數據，以及合理的運動數學模式，估測其縱移、橫移、平擺及起伏等運動模式中的參數數值。由於各維度之運動模式使用到的螺槳推力配置各不相同，因此在參數估測的程序中，需針對各維度運動設計參數估測方法。本計畫提出一個最小平方差估測方法，用來估算載具之運動參數。並使用數值模擬方法，驗證本發法之可行性。在載具製作方面，本年度完成潛艇硬體之加工製作，以及遙控軟體之撰寫。目前正進行系統組裝及測試載具之接頭、纜線系統、電源及控制電路等工作。			
出版日期	頁數	工本費	本 出 版 品 取 得 方 式
96 年 5 月	66	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【限】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 (2/4)			
ISBN (OR ISSN) 978-986-00-9743-6 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009601224	IOT SERIAL NUMBER 96-74-7288	PROJECT NUMBER 95-H2DB009
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yuang-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chiu Yuang-fang PROJECT STAFF: Tsai Chin-chi PHONE: +886-4-26587221 FAX: +886-4-26571329			PROJECT PERIOD FROM March 2006 TO November 2006
RESEARCH AGENCY: NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY PRINCIPAL INVESTIGATOR: Guo Jen-hwa PROJECT STAFF: Chiu Fornng-chen ADDRESS: No.1, Sec. 4, Roosevelt Road, Taipei 106, Taiwan, R.O.C PHONE: +886-2-33665739			
KEY WORDS: Underwater robotics, Robot, automation			
ABSTRACT The goal of the research is to study the system design of an underwater robot for the inspection of underwater structure. 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 follows: 1.Design issues for the underwater robotic system, 2. Design issues for the control system, 3. Design issues for 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. The paper presents a method for parameter identification of the underwater robotic model. The robot has four thrusters. With proper thrust distribution algorithms, the robot is able to move in surge, sway, heave, and yaw directions. The robot has different dynamic responses in each of its degree-of-freedom due to the open-frame design. Mathematical models are established for each degree-of-freedom. Least squares method is used to find the values of model parameters. Computer simulations are then used to verify the approach presented here. The robot's frame, pressure tube, and control system are currently being designed and constructed.			
DATE OF PUBLICATION May 2007	NUMBER OF PAGES 66	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 計畫簡介	1
1.1 前言	1
1.2 第一年期主要成果	2
1.3 第二年研究內容與果	2
第二章 推力分配	5
2.1 螺槳推力分配	5
2.2 螺槳推力數據	8
第三章 參數估測	11
3.1 系統模式	11
3.2 縱移運動	12
3.3 起伏運動	15
3.4 橫移運動	15
3.5 平擺運動	16
3.6 數值模擬	17
第四章 載具製作	21

4.1 系統規劃	21
4.2 載具元件	22
4.2.1 外型支架及耐壓容器	24
4.2.2 導航控制	25
4.2.3 作業平台與電源	29
第五章 結語	31
參考文獻	35
附錄一	37
附錄二	43
附錄三	49

圖目錄

圖 2.1 螺槳、導航儀器及壓力容器之配置	9
圖 2.2 螺槳尺寸	10
圖 2.3 螺槳推力曲線	10
圖 3.1 參數鑑定結果與真實系統之步階響應比比較	20
圖 4.1 載具外型與主要尺寸	22
圖 4.2 載具之硬體架構	23
圖 4.3 載具之軟體架構	24
圖 4.4 載具之外框	25
圖 4.5 都卜勒聲納	26
圖 4.6 控制電腦及 DAC 界面卡	27
圖 4.7 Analog Isolation 界面卡	28
圖 4.8 螺槳推進器	28
圖 4.9 作業及載具收納支架	29
圖 4.10 電源轉換器	30
圖 4.11 電源及信號接頭	30
圖 5.1 港口水下多聲束聲納影像	32
圖 5.2 防波堤水下多聲束聲納影像	32
圖 5.3 沈箱間隙之光學影像	33
圖 5.4 護基方塊間隙之光學影像	33
圖 5.5 拋石觀測任務示意圖	34

表目錄

表 2.1 各運動方向之螺槳推力分佈	7
表 2.2 螺槳推力數據	8
表 3.1 前進方向估測參數與真實參數值之比較	20
表 4.1 設計規格	21
表 4.2 都卜勒速度聲納之技術規範	27
表 4.3 磁力式航向角感測儀、傾斜儀、深度計規格	27

第一章 計畫簡介

1.1 前言

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]。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，以建立屬於台灣自主的技術能力應是迫切且極具意義的。

1.2 第一年期主要成果

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。

載具的控制器，由導航器所計算所得的誤差空間座標及其微分作為輸入，得到輸出值來當作螺槳馬達的命令值。控制器的設計的目的，是利用比例微分加上滑動控制[5]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，是以比例微分方法來控制調整。本計畫所發展的運動控制方式為一穩定的控制器，並求得系統性能參數與控制增益之關係式，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。

1.3 第二年研究內容與成果

本計畫第二年(本期)進行系統模式鑑定方法之研究，並依據第一年步驟 2 所探討的結果，採用適宜之外形尺寸以進行系統原型的細部設計，並進行耐壓外殼、支架之製作組裝。以下簡述第二年所獲得之主要成果：

在系統模式鑑定部分，本計畫提出一具水下無人載具之設計方案。此載具可用於港灣水下結構物之自動化觀測。載具使用四具螺槳

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，且各維度之運動模式所使用的螺槳推力配置各不相同，在參數估測的程序中，需針對各維度運動，分別設計參數估測方法。本計畫提出一個最小平方差估測方法，用來估算載具之縱移、橫移、平擺及起伏等運動參數。並使用數值模擬方法，鑑定運動方程式之參數，建立其數學模型。

在載具製作方面，本年度完成潛艇硬體之加工製作，以及遙控軟體之撰寫。目前正進行系統組裝及測試載具之接頭、纜線系統、電源及控制電路等工作。

第二章 推力分配

2.1 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 y 方向的推力分量， F_3 , F_4 為螺槳 3 與螺槳 4 在 x 方向的推力分量。 L_1 , L_2 , L_3 , 及 L_4 分別為螺槳推力與座標中心點的力臂長度。

$$F_x = -F_3 - F_4$$

$$F_y = -F_1 \cos \alpha + F_2 \cos \alpha$$

$$M_z = F_1 \cos \alpha \times L_1 - F_2 \cos \alpha \times L_2 + F_3 \times L_3 - F_4 \times L_4 \quad (2-1)$$

$$F_z = -F_1 \sin \alpha - F_2 \sin \alpha$$

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。 α 為螺槳推力 F_1 、 F_2 與水平面之夾角。 α 之設計，其目的是為產生平移與起伏之分力，故不宜為 0° 和 90° 。式(2-1)可改寫為

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1 \\ -\cos \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ L_1 \cos \alpha & -L_2 \cos \alpha & L_3 & -L_4 \\ -\sin \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

令

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \\ F_z \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1 \\ -\cos \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ L_1 \cos \alpha & -L_2 \cos \alpha & L_3 & -L_4 \\ -\sin \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

所以，

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A} \mathbf{X} \quad (2-4)$$

根據上式所推得的螺槳輸出關係，可解得四具螺槳的推力。

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{Y} \quad (2-5)$$

其中

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{0.5}{\cos(\alpha)} & 0 & -\frac{0.5}{\sin(\alpha)} \\ 0 & \frac{0.5}{\cos(\alpha)} & 0 & \frac{0.5}{\sin(\alpha)} \\ \frac{-L_4}{L_3 + L_4} & 0.5 \frac{L_1 + L_2}{L_3 + L_4} & \frac{1}{L_3 + L_4} & 0.5 \frac{\cos(\alpha)(L_1 - L_2)(L_3 + L_4)}{\sin(\alpha)} \\ \frac{-L_3}{L_3 + L_4} & -0.5 \frac{L_1 + L_2}{L_3 + L_4} & \frac{-1}{L_3 + L_4} & -0.5 \frac{\cos(\alpha)(L_1 - L_2)(L_3 + L_4)}{\sin(\alpha)} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

或

$$F_1 = -\frac{0.5}{\cos(\alpha)} F_y - \frac{0.5}{\sin(\alpha)} F_z$$

$$F_2 = \frac{0.5}{\cos(\alpha)} F_y - \frac{0.5}{\sin(\alpha)} F_z$$

$$F_3 = \frac{-L_4}{L_3 + L_4} F_x + 0.5 \frac{L_1 + L_2}{L_3 + L_4} F_y + \frac{1}{L_3 + L_4} M_z + 0.5 \frac{\cos(\alpha)(L_1 - L_2)(L_3 + L_4)}{\sin(\alpha)} F_z$$

$$F_4 = \frac{-L_3}{L_3 + L_4} F_x - 0.5 \frac{L_1 + L_2}{L_3 + L_4} F_y - \frac{1}{L_3 + L_4} M_z - 0.5 \frac{\cos(\alpha)(L_1 - L_2)(L_3 + L_4)}{\sin(\alpha)} F_z$$

由於各螺槳之實際輸出推力計算必須使用螺槳之靜水下之推力曲線估算，因此推力的需求與實際輸出推力間存在誤差，此誤差為造成控制誤差的因素之一。表 2.1 所示之各運動方向之螺槳推力分佈方式，可以用來控制載具之各維度運動。

表 2.1 各運動方向之螺槳推力分佈

運動方向	推力設定	F_1	F_2	F_3	F_4
縱移	$F_x \neq 0;$ $F_y = M_z$ $F_z = 0$	0	0	$\frac{-L_4}{L_3 + L_4} F_x$	$\frac{-L_3}{L_3 + L_4} F_x$
橫移	$F_y \neq 0;$ $F_x = M_z$ $F_z = 0$	$\frac{-0.5}{\cos(\alpha)} F_y$	$\frac{0.5}{\cos(\alpha)} F_y$	$\frac{0.5(L_1 + L_2)}{(L_3 + L_4)} F_y$	$\frac{-0.5(L_1 + L_2)}{(L_3 + L_4)} F_y$
平擺	$M_z \neq 0;$ $F_x = F_y$ $F_z = 0$	0	0	$\frac{1}{L_3 + L_4} M_z$	$\frac{-1}{L_3 + L_4} M_z$
起伏	$F_z \neq 0;$ $F_x = F_y$ $M_z = 0$	$\frac{-0.5}{\sin(\alpha)} F_z$	$\frac{-0.5}{\sin(\alpha)} F_z$	$0.5 \frac{\cos(\alpha)(L_1 - L_2)(L_3 + L_4)}{\sin(\alpha)} F_z$	$-0.5 \frac{\cos(\alpha)(L_1 - L_2)(L_3 + L_4)}{\sin(\alpha)} F_z$

2.2 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 2.2 所示。表 2.2 為此螺槳推進器在靜止下的推力與電壓關係，圖 2.3 為此數據之圖形表示，其中明顯可見在電壓輸出 ± 0.5 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。

表 2.2 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

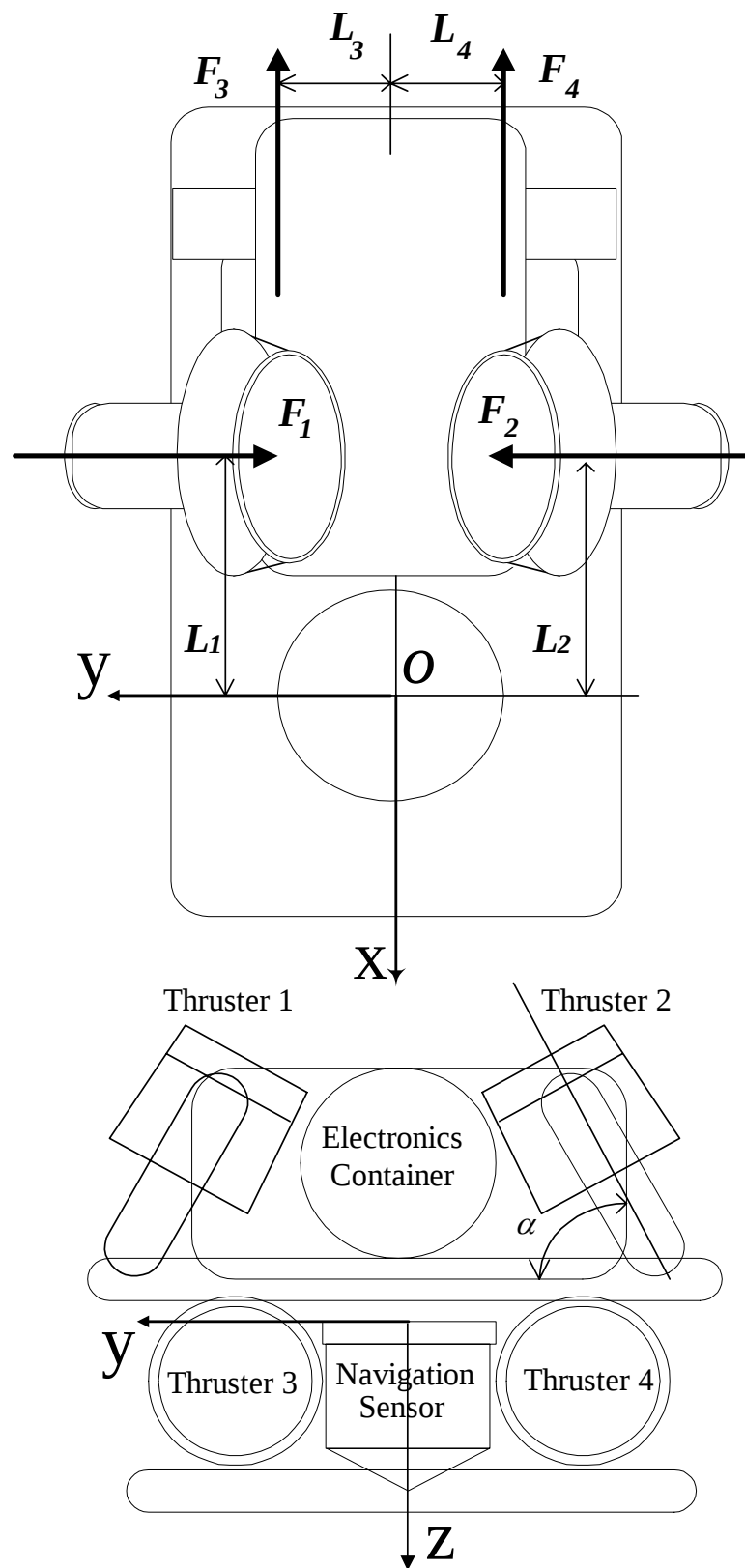


圖 2.1 螺槳、導航儀器及壓力容器之配置

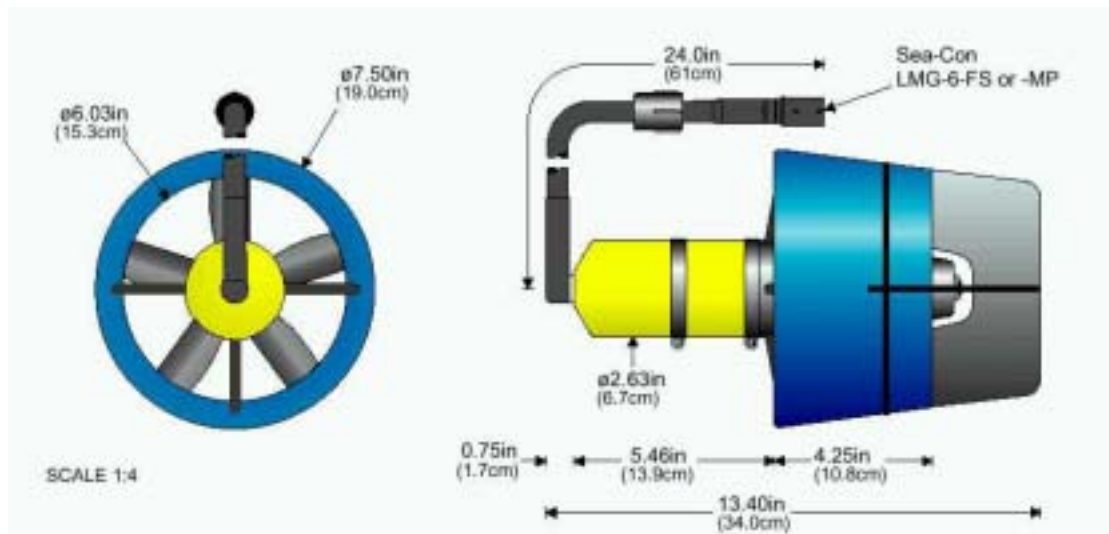


圖 2.2 螺槳尺寸

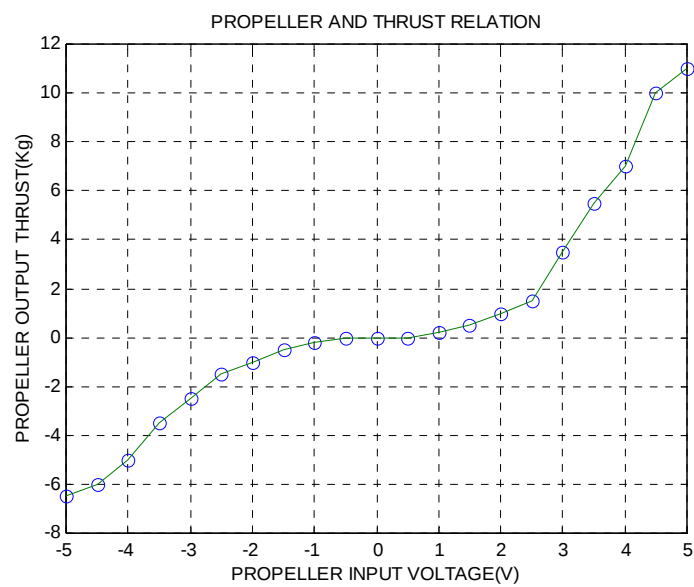


圖 2.3 螺槳推力曲線

第三章 參數估測

3.1 系統模式

本計畫規劃之水下載具，其外型及主要規格於圖 2.1 及表 1.1 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，來表示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：

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{\dot{v}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{\dot{w}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ w \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} c_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u|u| \\ v|v| \\ r|r| \\ w|w| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \\ F_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_u \\ n_v \\ n_r \\ n_w \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-1)$$

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； $m_{\dot{u}}$ 、 $m_{\dot{v}}$ 為載具在縱移及側移方向之質量及附加質量， $I_{\dot{r}}$ 為平擺之轉動慣量， $m_{\dot{w}}$ 為垂直面之質量及附加質量； b_u 、 b_v 、 c_u 、 c_v 分別為縱移及側移方向之線性及二次阻尼係數， b_r 、 c_r 分別為平擺之線性及二次阻尼係數， b_w 、 c_w 分別為垂直面運動方向之線性及二次阻尼係數；

F_x 、 F_y 、 F_z 為螺槳推力， M_z 為轉矩。式(3-1)中以 n_u 、 n_v 、 n_r 及 n_w 代表 u 、 v 、 r 及 w 方向之模式誤差及干擾。式 (3.1) 之假設及適用範圍為載具在零速度附近之動態。由於載具運動處於接近於零之速度及角速度，各自由度之耦合數值很小（耦合係數與加速度或速度之相乘積為很小），因此將各自由度之耦合項相加成為一項，再移項至等式右邊，此耦合成分包含於符號 n_u 、 n_v 、 n_r 、 n_w 所表示之干擾力及干擾力矩。

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。

由上述載具在各維度的運動互不耦合的假設，可以用來設計參數估測的方法。干擾力及干擾力矩在建立載具模式過程中並未被忽略，只是在參數估測及控制器設計時，將之視為模式之不確定值，加以估測，進而以控制方法加以消去其所造成的誤差效應。

以下針對各維度的參數估測方法分別討論。

3.2 縱移運動

縱移方程式如式(3-2)之形式，可表示如下：

$$m_u \dot{u} + b_u u + c_u u |u| = \bar{F}_x + n_u \quad (3-2)$$

縱移運動之驅動力， $\bar{F}_x$ 乃由螺槳 3 及 4 推力所合成（式 2-2）。 $\bar{F}_x$ 所表

示之推力定義為：

$$\bar{F}_x = t_u F_x \quad (3-3)$$

上式中， t_u 定義為縱移方向之推力減少係數，在縱移運動之正方向與負方向，其數值可能不同。此係數是用來表示螺槳在載具機體附近工作時，其推力輸出與單獨螺槳推力的輸出的比例。例如， $t = 0.6$ 表示其推力受機體之影響而減少 40%。 $\bar{F}_x$ 之數值是由運動控制器所設定， F_x 之驅動電壓則可以由單獨螺槳推力數據求得。當輸入之推力為一常數，則載具最終會達到穩態，亦即， $\dot{u} = 0$ 。若輸入一系列不同數值之常數推力，則參數 b_u 、 c_u 、 t_u 及 n_u 可以最小平方差法求得。

定義 S 為一誤差函數。

$$S = \sum_{i=1}^k \left(\dot{u}_i + \frac{b_u}{m_{\dot{u}}} u_i + \frac{c_u}{m_{\dot{u}}} u_i^2 - \frac{t_u}{m_{\dot{u}}} F_{x_i} - \frac{n_u}{m_{\dot{u}}} \right)^2 \quad (3-4)$$

上式中 k 為輸入與輸出之數據總數目， i 代表第 i 個輸入與輸出之數據。則此誤差函數對參數之梯度為：

$$\begin{aligned}
m_{\dot{u}} \frac{\partial S}{\partial b_u} &= 2 \sum_{i=1}^k u_i \left(\dot{u}_i + \frac{b_u}{m_{\dot{u}}} u_i + \frac{c_u}{m_{\dot{u}}} u_i^2 - \frac{t_u}{m_{\dot{u}}} F_{x_i} - \frac{n_u}{m_{\dot{u}}} \right) \\
m_{\dot{u}} \frac{\partial S}{\partial c_u} &= 2 \sum_{i=1}^k u_i^2 \left(\dot{u}_i + \frac{b_u}{m_{\dot{u}}} u_i + \frac{c_u}{m_{\dot{u}}} u_i^2 - \frac{t_u}{m_{\dot{u}}} F_{x_i} - \frac{n_u}{m_{\dot{u}}} \right) \\
m_{\dot{u}} \frac{\partial S}{\partial t_u} &= -2 \sum_{i=1}^k F_{x_i} \left(\dot{u}_i + \frac{b_u}{m_{\dot{u}}} u_i + \frac{c_u}{m_{\dot{u}}} u_i^2 - \frac{t_u}{m_{\dot{u}}} F_{x_i} - \frac{n_u}{m_{\dot{u}}} \right) \\
m_{\dot{u}} \frac{\partial S}{\partial n_u} &= -2 \sum_{i=1}^k \left(\dot{u}_i + \frac{b_u}{m_{\dot{u}}} u_i + \frac{c_u}{m_{\dot{u}}} u_i^2 - \frac{t_u}{m_{\dot{u}}} F_{x_i} - \frac{n_u}{m_{\dot{u}}} \right)
\end{aligned} \tag{3-5}$$

設定式 (3-5)之各式皆為零，則可得下列聯立之方程式：

$$\begin{aligned}
-\frac{b_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k u_i^2 - \frac{c_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k u_i^3 + \frac{t_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k u_i F_{x_i} + \frac{n_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k u_i &= \sum_{i=1}^k u_i \dot{u}_i \\
-\frac{b_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k u_i^3 - \frac{c_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k u_i^4 + \frac{t_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k u_i^2 F_{x_i} + \frac{n_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k u_i^2 &= \sum_{i=1}^k u_i^2 \dot{u}_i \\
-\frac{b_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k u_i F_{x_i} - \frac{c_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k u_i^2 F_{x_i} + \frac{t_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k F_{x_i}^2 + \frac{n_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k F_{x_i} &= \sum_{i=1}^k F_{x_i} \dot{u}_i \\
-\frac{b_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k u_i - \frac{c_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k u_i^2 + \frac{t_u}{m_{\dot{u}}} \sum_{i=1}^k F_{x_i} + \frac{n_u}{m_{\dot{u}}} &= \sum_{i=1}^k \dot{u}_i
\end{aligned} \tag{3-6}$$

$b_u/m_{\dot{u}}$ 、 $c_u/m_{\dot{u}}$ 、 $t_u/m_{\dot{u}}$ 及 $n_u/m_{\dot{u}}$ 為待解之參數，在縱移運動之正方向與負方向，其數值可能不同。解得這些參數後，再將其數值代入縱移模式，以便推求模式中的慣性係數 $m_{\dot{u}}$ 。這些參數之不確定性，可由誤差函數 S 推求。由於水下載具沒有配備加速度之量測儀器，因此需設計一加速度估測器，由速度推求加速度。

慣性係數之推求方法，可以將縱移模式對操作速度 u^* 做線性化，其結果為一階模式：

$$m_{\dot{u}} \dot{u} + k_L u = \bar{F}_x + n_u \tag{3-7}$$

上式中， $k_L = b_u + 2c_u |u^*|$ 。在常數推力輸入下，量測縱移系統速度響應之時間常數 t_c ，可間接推算出慣性係數。時間常數 t_c 之定義如下：

$$t_c = m_u / k_L \quad (3-8)$$

由誤差分析方法，可知 $\delta t_c / t_c \cong \delta k_L / k_L$ ，因此，估算慣性係數之不確定性與阻尼係數之不確定大小相當。

3.3 起伏運動

載具之起伏運動模式中，外力干擾項 n_w 可視為載具之淨浮力與壓載重量之和。因此，起伏之模式可以表示為：

$$m_{\dot{w}} \dot{w} + b_w w + c_w w |w| = \bar{F}_z + W + \Delta W \quad (3-9)$$

上式中， $\bar{F}_z = t_w F_z$ ， t_w 為起伏方向之推力減少係數，在起伏運動之正方向與負方向，其數值可能不同。 W 及 ΔW 分別表示載具之淨浮力，以及壓載重量。由於載具之淨浮力通常設計為正值，模式耦合項 n_w 包含於 W ，而壓載重量 ΔW 需因實驗水域不同而調整，因此系統參數估測可以用已知之壓載，輸入不同數值之常數起伏推力，記錄起伏運動 w 與 $\dot{w}$ 之時間歷程，使用上節的最小平方差方法，以推求 $m_{\dot{w}}$ 、 b_w 、 c_w 、 t_w 及 W 。

3.4 橫移運動

由表 2.1 之推力分佈，可知橫移運動需要使用所有的四具螺槳。

由於此運動特性，其模式之表示方法在推力減少係數方面，必須考慮螺槳 1 與 2，螺槳 3 與 4 之配置位置與安裝方法不同。因此，其推力減少係數以 t_v^{12} 、 t_v^{34} 分別代表螺槳 1 與 2 之合成推力 F_y^{12} ，螺槳 3 與 4 之合成推力 F_y^{34} 的推力減少效應。

$$\bar{F}_y = t_v^{12} F_y^{12} + t_v^{34} F_y^{34} \quad (3-10)$$

因此，橫移運動之模式可表示如下：

$$m_v \dot{v} + b_v v + c_v v |v| = \bar{F}_y + n_v \quad (3-11)$$

其中待測之參數分別為： m_v 、 b_v 、 c_v 、 t_v^{12} 、 t_v^{34} 及 n_v 。

3.5 平擺運動

由於本載具所設計之纜線連結方法，平擺運動將受到最大的纜線外力干擾。所以，平擺運動之系統參數鑑定過程，必須限制載具平擺角度之範圍（例如 $\pm 30^\circ$ ），以免纜線干擾項過大，造成參數估測之不可行。小範圍之平擺運動亦同時限制了其平擺角速度，因此可預期其二次阻尼係數可能影響很小，可以被忽略。根據上述原因，平擺運動模式之表示式如下：

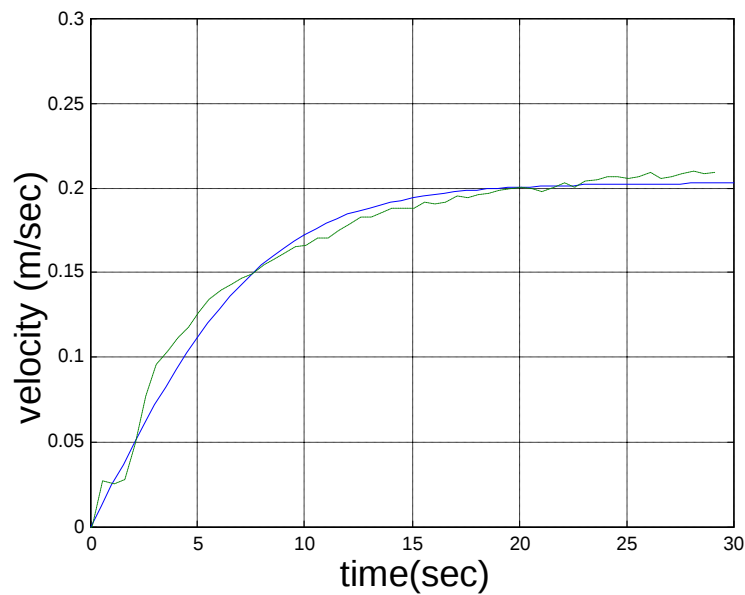
$$I_r \dot{r} + b_r r = t_r M_z + n_r \quad (3-12)$$

上式中， t_r 為平擺方向之力矩減少係數，待測之參數分別為： I_r 、 b_r 、

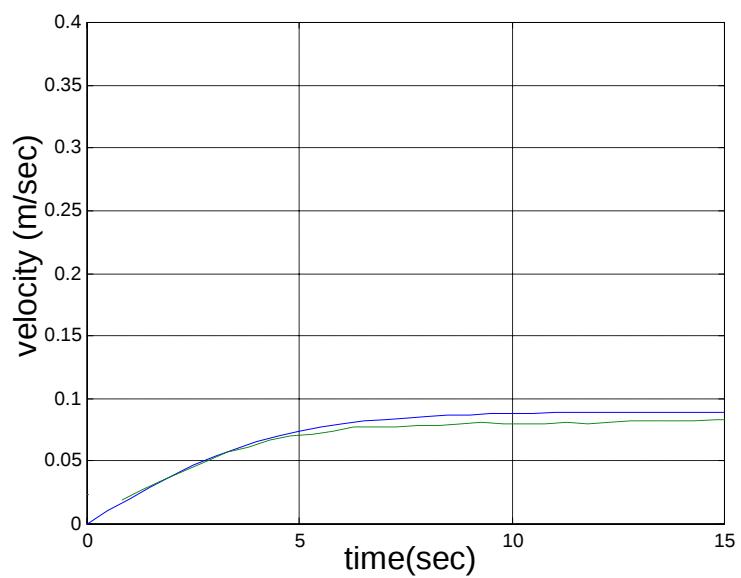
t_r 及 n_r 。

3.6 數值模擬

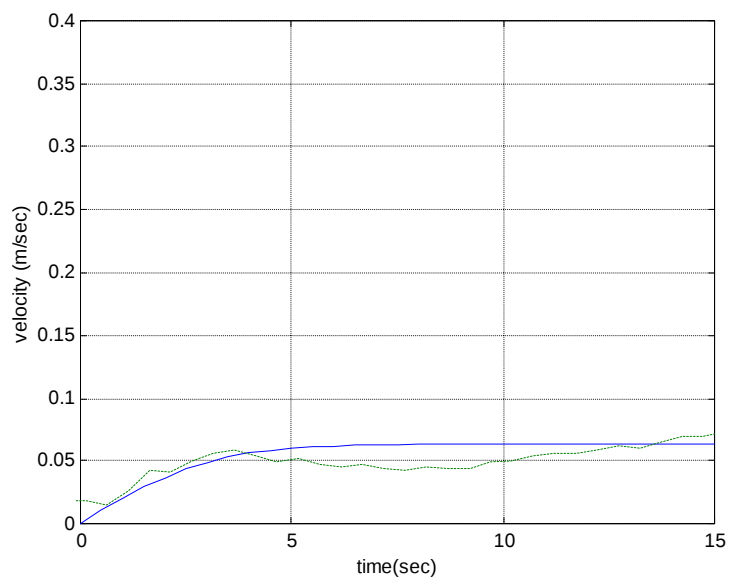
本節使用數值模擬驗證參數估測方法。先行假設載具之真實參數，並根據最小平方法，以推求系統參數。單獨螺槳之電壓與推力關係是由一具螺槳之靜止推力試驗數據求得。圖 3.1 所示為各方向種運動情況，其中雜訊的模擬，代表儀器之量測誤差。載具之模擬路徑，與代入估測參數值後之模式響應比較，由表 3.1 所示估測誤差結果為前進方向之估測參數、與估測誤差，可以看出，本計畫提出之載具參數估測方法是可行的。



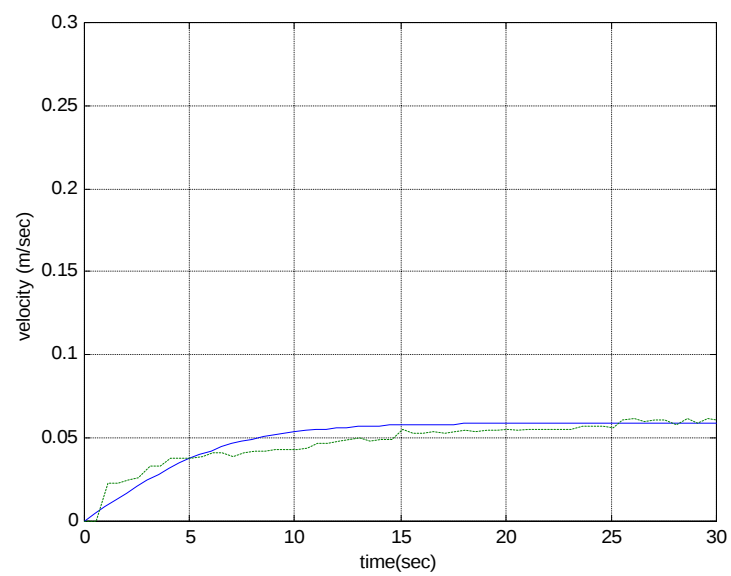
(a) 右向橫移運動模擬



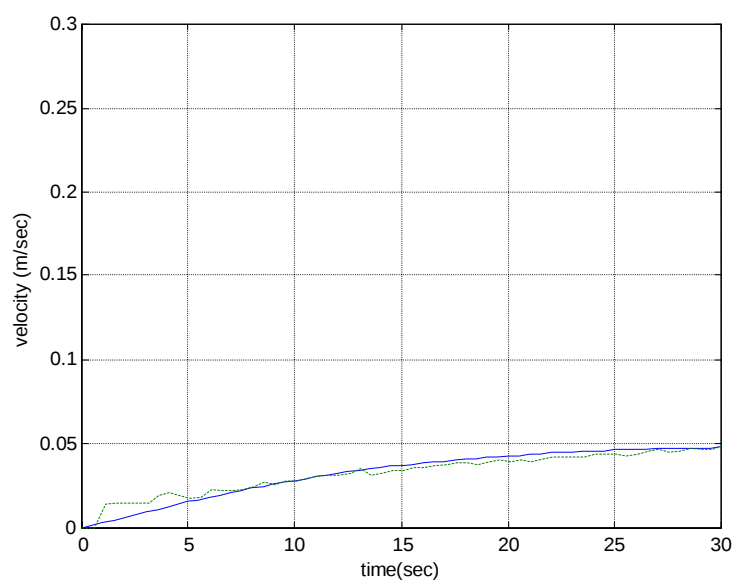
(b) 後退運動模擬



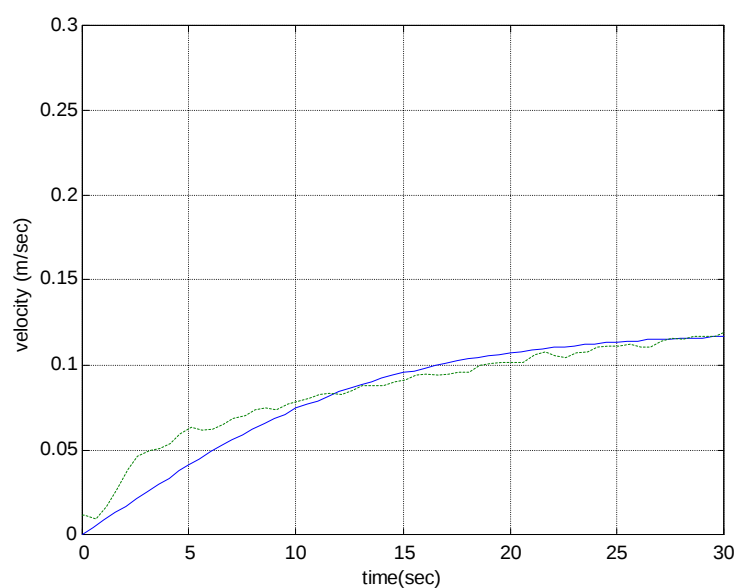
(c) 前進運動模擬



(d) 左向橫移運動模擬



(e) 起伏向上運動模擬



(f) 起伏向下運動模擬

圖 3.1 參數鑑定結果與真實系統之步階響應比較
(虛線為真實系統，實線為鑑定所得系統)

表 3.1 前進方向估測參數與真實參數值之比較

Parameter	True Value	Identified Value	Absolute Error
$m_{\ddot{u}}$	10	9.50	0.5
b_u	25	22.90	2.1
c_u	2.15	2.12	0.03
t_u	0.7	0.83	0.13
n_u	0.2	0.13	0.07

第四章 載具製作

4.1 系統規劃

本計畫設計之水下遙控載具，其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、螺漿、控制筒)；感測元件(都卜勒、光學攝影機)；導航控制電腦；人機界面；支援次系統(纜線、交流轉直流電源供應器、纜線車架)；載具以 200 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。設計規格如表 4.1 所示。

表 4.1 設計規格

項目	規格
外型尺寸	1.0m(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

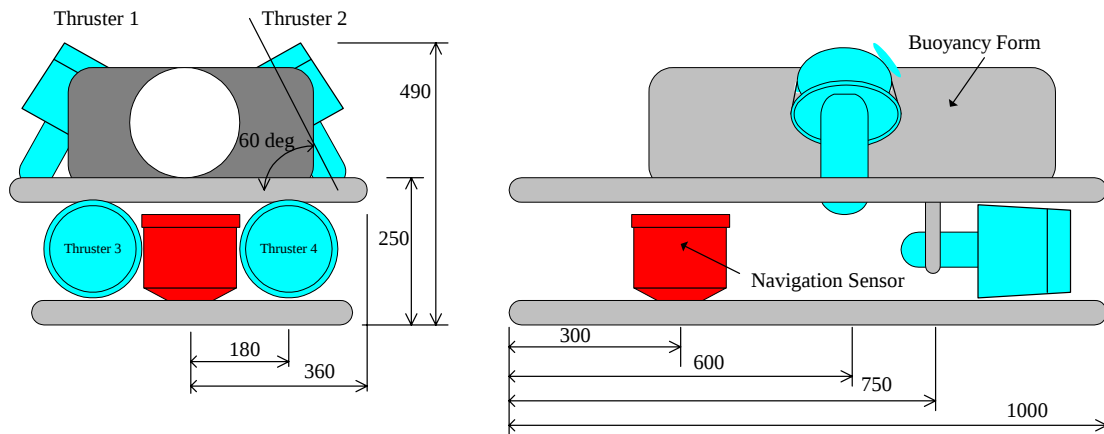


圖 4.1 載具外型與主要尺寸

4.2 載具元件

圖 4.1 為本計畫製作中之水下無人載具本體之外型與主要尺寸。載具的硬體架構如圖 4.2 所示，其軟體規劃如圖 4.3 所示。各組成元件之說明如下：

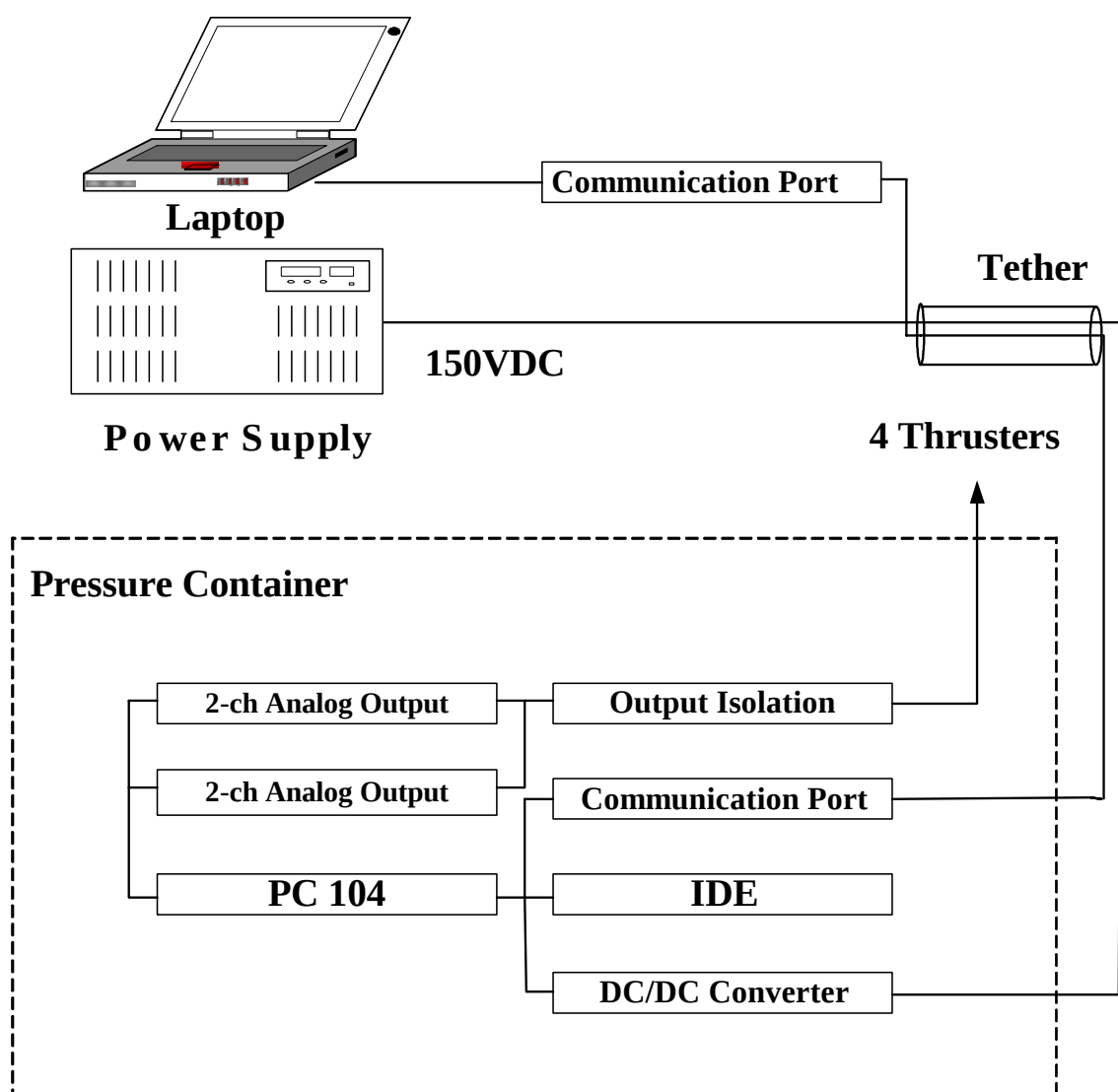


圖 4.2 載具之硬體架構

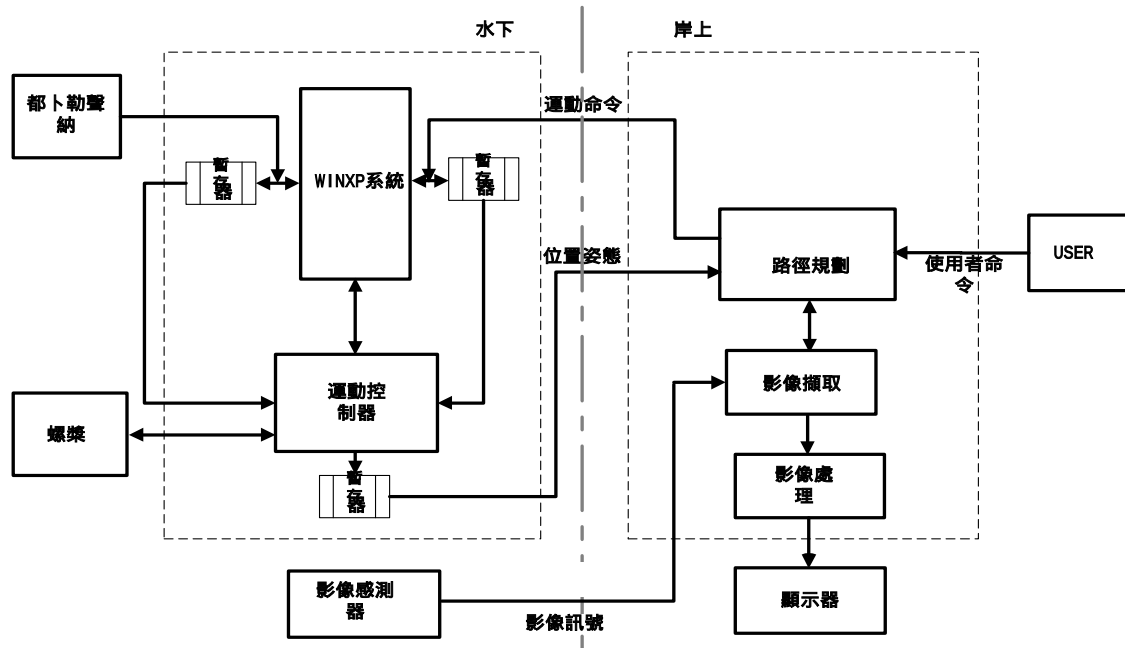


圖 4.3 載具之軟體架構

4.2.1 外型支架及耐壓容器

載具的外框及儀器支架如圖 4.5 所示。開框架方式之優點是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。外型支架及耐壓容器之說明如下：

- 耐壓容器: 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，圓筒形狀在製造及拆裝為最方便。
- 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，並可於其上固定耐壓容器、感測元件、螺旋槳推進器、浮力材。採用開框架設計之優點是較容易追加設備及調整浮力、易於維修、水下運動較安定等。
- 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，並可於其上固定耐壓容器、感測元件、螺槳推進器、浮力材。採用開框架設計之優點是較容易追加設備及調整浮力、易於維修、水下運動較安定等。



圖 4.4 載具之外框

4.2.2 導航控制

本計畫所建造之載具系統與傳統之遙控載具最大分別在其具有精確的導航及運動控制能力。導航控制與視訊攝影機配合，方能登錄載具運動時擷取之環境影像，進而組合不同觀測點之影像資料，以形成大範圍影像。導航控制的資料傳遞，是由岸上電腦利用臍帶的同軸電纜與載具的控制電腦作網路通訊，而水下電腦也經由此網路將資料即時送到岸上電腦，完成岸上及水下電腦間的通訊。

導航系統包含一具都卜勒導航聲納，如圖 4.5 所示。控制電腦為工業用電腦，相關控制界面包含 DAC 2 channel card (圖 4.6) 及 4 axis isolation card (圖 4.7) 皆置於耐壓容器中。載具運動則由 4 具螺槳推進器 (圖 4.8) 來達成。控制電腦作業平台為 Windows XP，及一個在個人電腦上執行的 Lab windows 作業程式，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 4.2 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 4.3 所示。操作者可由鍵盤輸入位置指令，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。載具之人機圖控界面之顯示內容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，由一臍帶電纜下傳至水下之控制電腦。此臍帶電纜需符合下列要求：強度足以支持載具重量、小直徑、正浮力及足夠之柔軟度。

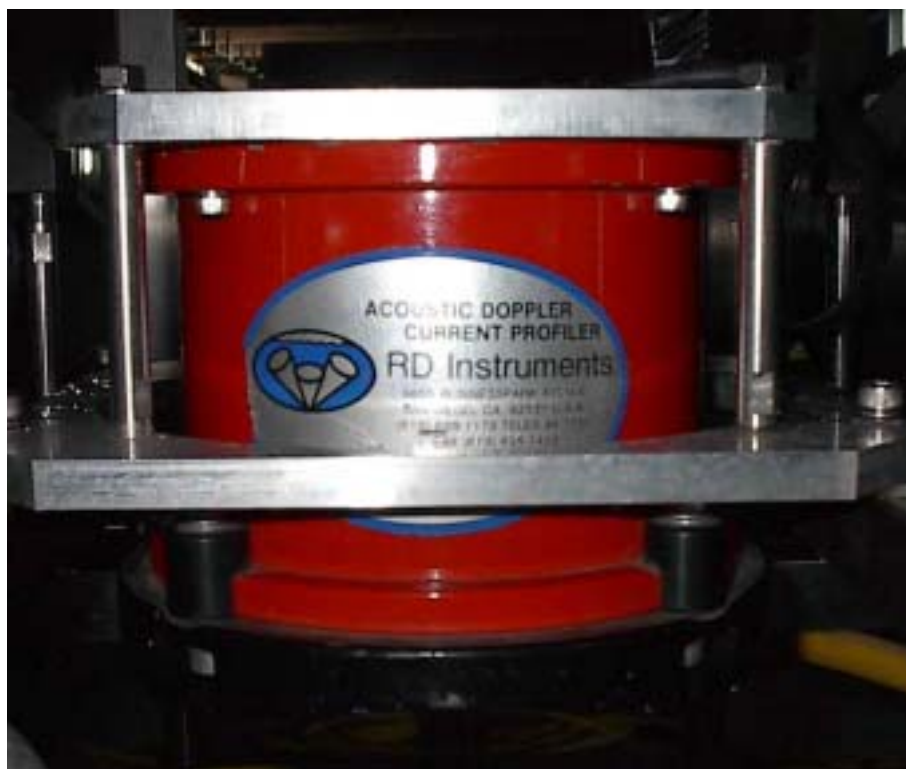


圖 4.5 都卜勒聲納

表 4.2 都卜勒速度聲納之技術規範

Frequency	1200KHz
Altitude	1-200m
Precision (Bottom)	0.3cm/s (V=1.0 m/s)
Accuracy (Bottom)	± 0.4%
Weight (in air)	9.7 kg

表 4.3 磁力式航向角感測儀、傾斜儀、深度計規格

Signal	Type	Range	Accuracy	
Heading	Flux-gate	360 deg	±5 deg	Tilt<20 deg
Roll/Pitch	Electrolytic	±15 deg	±2 deg	Maximum=35 deg
Pressure	Piezoresistive	300 psi	±0.5%	



圖 4.6 控制電腦及 DAC 界面卡



圖 4.7 Analog Isolation 界面卡



圖 4.8 螺槳推進器

4.2.3 作業平台與電源

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需要一專用之收納空間，本計畫所製作之載具工作台及收納支架如圖 4.9 所示。作業時需要以小型工作船或小型卡車擔任支援工作，以人力將載具吊放至水中，作業結束時亦使用人力回收載具。

電源之供應，由圖 4.9 中所示之電源供應器，經由纜線連接水下之電壓轉換器，提供載具控制、計算等工作所需之電源。圖 4.10、圖 4.11 分別為水下的電壓轉換器，以及電源及信號接頭之外觀。



圖 4.9 作業及載具收納支架

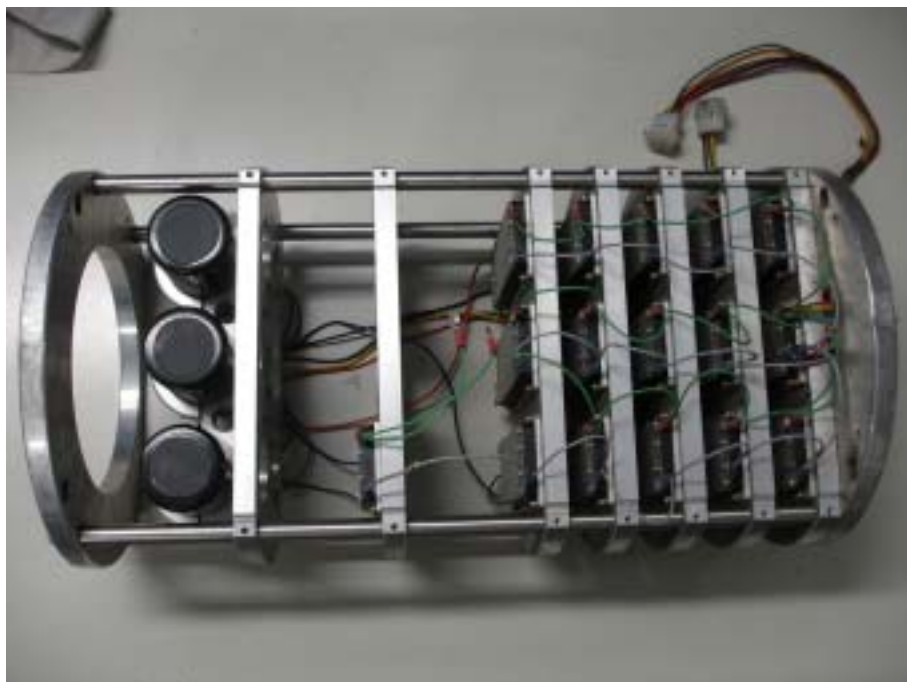


圖 4.10 電源轉換器



圖 4.11 電源及信號接頭

第五章 結論

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 [6]。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：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，可以整合出整體結構物表面的影像資料。傳統水下物體表面檢測方法，多使用側掃聲納、多聲束聲納等儀器大範圍掃描港口防波堤之水下圖像，例如圖 5.1、圖 5.2 所示為多聲束聲納探測所得之港口與防波堤水下影像。影像之掃描線間隔約為 20-50 公分，此解析度不適用於細部之水下結構物表面探測工作。圖 5.3、圖 5.4 為使用光學攝影機之表面探測結果。其解析度較佳，但可視範圍較小。因此，有效運用本計畫所發展之水下載具，利用攝影機之運動，獲取大範圍影像，配合載具之定位資訊，將十分有助於水下結構物觀測工作。圖 5.5 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，觀測過程中操作者立於堤上，由於在岸上的人機界面會顯示載具之即時狀態，且載具之移動緩慢，操作者跟隨載具之運動而移動，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。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。所得之影像數據，可與側掃聲納、多聲束聲納或潛水人員之探測數據互相參考，影像數據並可經由影像拼嵌技術，而得到水下物體之高解析度、大範圍影像。

本計畫在今年度已完成水下載具之系統模式鑑定方法之研究，並完成系統原型的細步設計，耐壓外殼、支架、電源及控制電路等之製

作組裝。

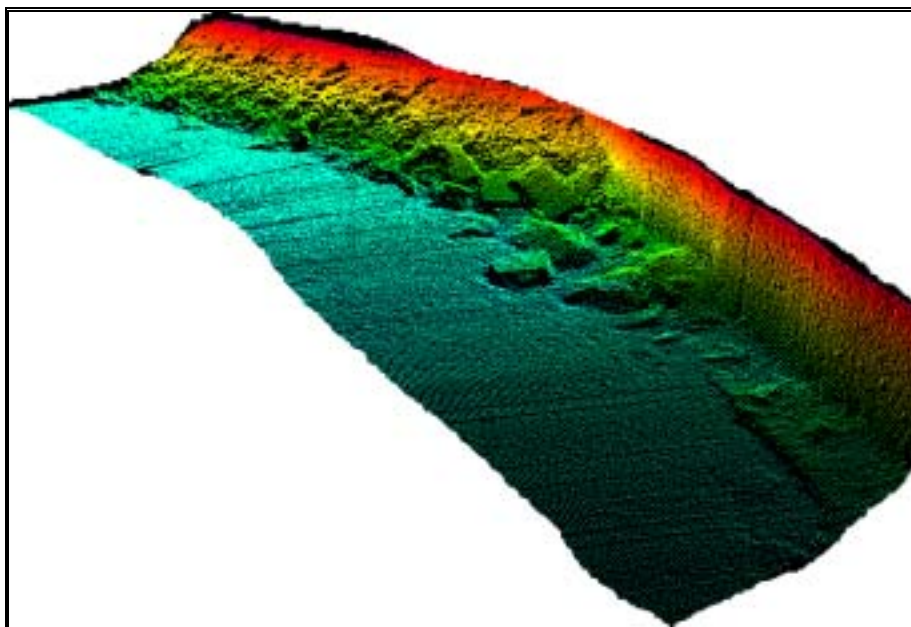


圖 5.1 港口水下多聲束聲納影像

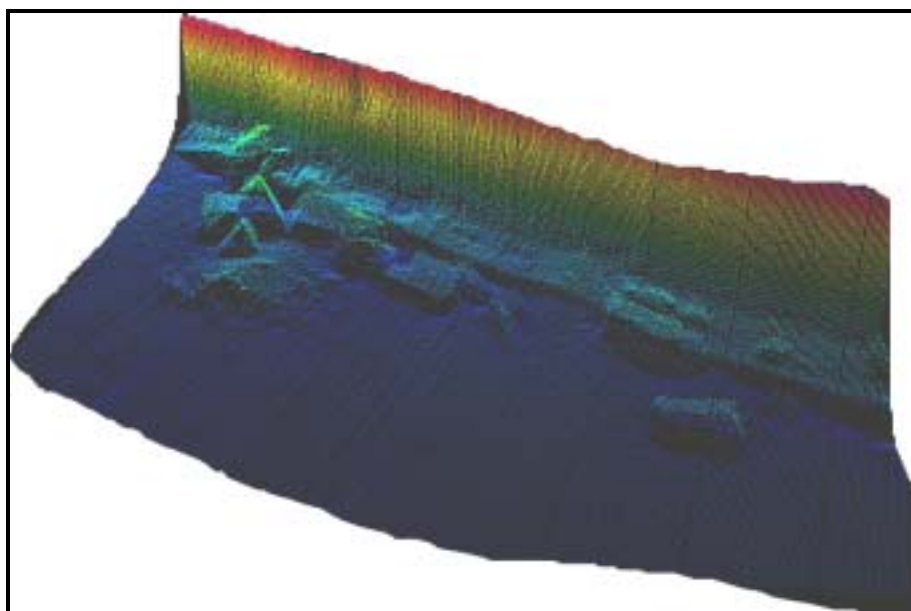


圖 5.2 防波堤水下多聲束聲納影像



圖 5.3 沈箱間隙之光學影像

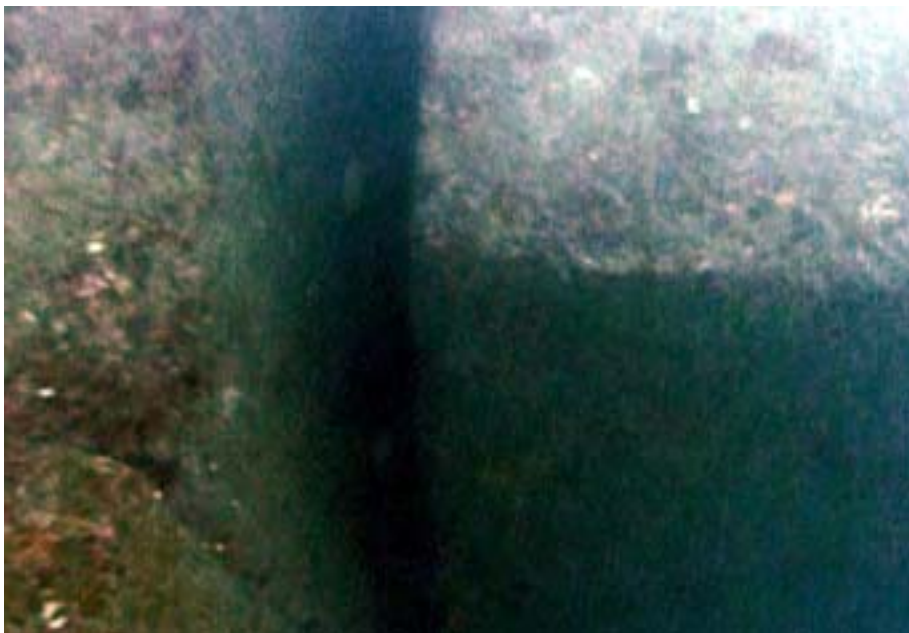


圖 5.4 護基方塊間隙之光學影像

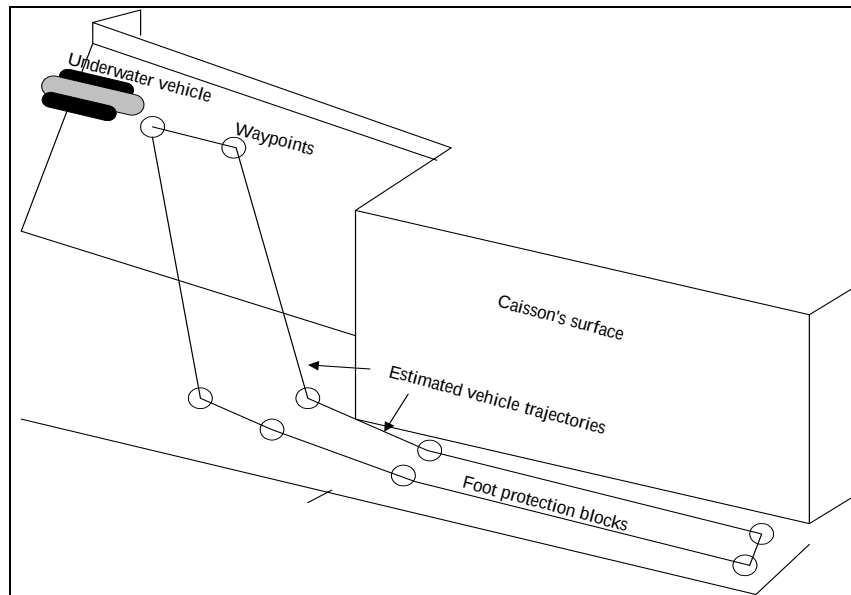


圖 5.5 拋石觀測任務示意圖

參考文獻

1. M. Caccia and G. Veruggio, "Modeling and Identification of pen-Frame Variable Configuration Unmanned Vehicles", *IEEE Journal of Ocean Engineering*, VoL.25, No.2, April 2000.
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.
3. W. Koterayama, S. Yamaguchi, T. Yokobiki, J. H. Yoon, H. Hase, " Space-time Measurements on Ocean Current and Chemical Properities with the Intelligent Towed Vehicle 'Flying Fish' ," , *IEEE Journal of Ocean Engineering*, VoL.25, No.1, pp. 130-138, 1990.
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。
5. 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.
6. 邱永芳等，"蘇澳港防波堤改善工程規劃"，臺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-95-H2DB009

計畫名稱：水下結構物自動檢測系統研究(2/4)

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、本期中報告符合計畫之載具本體設計方案，建立載具螺槳推力之分配方式。 二、報告可列入整體計畫之甘特圖於本期之進度。 三、本計畫已進入載體設計所需之耐壓力、浮材、接頭、電源、纜線及控制電路等，宜列一小節簡述作為延續期末之工作報告。	一、感謝委員的評論。 二、期末報告中，將列入整體計畫之甘特圖與本期進度。 三、期末報告將專列一章說明載具硬體設計。	一、符合。 二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。
黃漢邦 教授 一、期中報告已建立數學模型及數值模擬，已符合進度。 二、Eq (3.4) 誤差函數之物理意義須加以說明。	一、感謝委員的評論。 二、Eq (3.4) 誤差函數中，u_i，$\dot{u}_i$，及 F_{x_i} 為儀器量測之速度、加速度、及推力之估計值，將其代入系統模型，經最小化	一、符合。 二、依處理情形辦理。

三、Eq (3.1) 之假設及適用範圍須加以說明。	處理，來求取模型中之參數之估計值。 三、Eq (3.1) 之假設及適用範圍為載具在零速度附近之動態。由於載具處於接近於零之速度及角速度，各自由度之耦合數值很小（耦合係數與加速度或速度之相乘積為很小），因此將各自由度之耦合項相加成為一項，再移項至等式右邊，此耦合成分包含於符號 n_u、n_v、n_r、n_w 所表示之干擾力及干擾力矩。	三、依處理情形辦理。
四、Eq (3.1) 及 (3.2) 後之方程式，是 m_u 或 $m_u ? m_w$ 或 $m_u ? m_v$ 或 $m_u ? I_r$ 或 $I_r ?$	四、Eq (3.1) 中質量係數之下標皆須改為加速度形式，即 $m_{\ddot{u}}$ 等。	四、依處理情形辦理。
五、目前已利用 PD controller 進行模擬，未來可考慮 Sliding mode controller，以補償 uncertainty。	五、本計畫所設計之控制器，已考慮補償 uncertainty 之功能，未來實驗時將再確認控制器之可行性。	五、依處理情形辦理。
六、載具設計是否已考慮前進時之阻力效應？	六、載具設計時將承載物截面最小之方向朝向前面，以減低前進之阻力。	六、依處理情形辦理。
七、Eq (2.1) 應繪圖說明 F_x、F_y、F_z、M_z、F_1、F_2、	七、將在期末報告中繪圖說明 α 與其他推力項之關	七、依處理情形辦理。

F_3、F_4、α 間之相互關係，又 α 是否可為 0° 和 90°？ 八 可將數值模擬之結果加在報告書內。	係。α 之設計，其目的是為產生平移與起伏之分力，故不宜為 0° 和 90°。 八、期末報告中將包含數值模擬之結果。	八、依處理情形辦理。
林顯群 教授 一、期中報告部分已完成數學理論與數值驗證部分，二者十分吻合，代表其可信度已經檢驗過，唯最後之確認應經實體測試。 二、目前似乎尚未購置控制螺槳，缺少這 4 個螺槳如何執行 ” 現製造中的載具 ”，以達到本年度目標 (完成初步測試)？ 三、載具之防水性十分重要，在製作完成後要如何確認其安全無虞？ 綜合看來，目前計畫進度順利，所預定達成之目標亦符合要求，至於下半年規畫項目亦屬合理。	一、將在期末報告中進一步確認。 二、將以借用的方式先行安裝 4 個螺槳在載具上，做初步測試。 三、在實測之前將做耐壓試驗，確認各元件之耐壓性能。	一、依處理情形辦理。 二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。
黃明志 教授 一、載具以 100 公尺纜線與操作者界面相連，並不代表操作深度即為 100 公尺，此外，觀測路徑全長 200 公尺之目標如何達	一、觀測過程操作者立於堤上，由於載具在岸上的人機界面會顯示載具之即時狀態，且載具之移動緩慢，操作者若跟隨	一、依處理情形辦理。

到。 二、第二章公式不夠清晰，該用下標表示之處，如 F_1、F_2、F_3、F_4、L_1、L_2、L_3、L_4、F_x、F_y、M_z、F_z，應更正。 三、圖 2-3 與圖 2-4 座標標示不一致 Propeller output thrust / input force，Propeller output voltage / output voltage，應統一。 四、報告中假設載具在各維度的運動速度很小，因此流體作用力之耦合很小，為了簡化控制器設計，可以忽略其耦合項，看來此段說明並不符合學理，而純粹只是為了簡化控制器設計。	載具之運動而移動，即可以完成規劃的觀測路徑。 二、期末報告中將使用上下標符號表達推力、轉矩、及距離。 三、期末報告中將會依照委員意見修正。 四、由於載具處於接近於零之速度及角速度，各自由度之耦合數值很小（耦合係數與加速度或速度之相乘積為很小），因此將各自由度之耦合項相加成為一項，再移項至等式右邊，此耦合成分包含於符號 n_u、n_v、n_r、n_w 所表示之干擾力及干擾力矩，並未被忽略，只是在控制器設計時，將之視為模式之不確定值，而以控制方法加以消去其所造成的誤差效應。	二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。 四、依處理情形辦理。
曾相茂 研究員 一、建議將第 5 頁之圖 1.1 放在第 3 頁與表 1.1 同頁中	一、期末報告中將會依委員意見修正。	一、依處理情形辦理。

以便比較閱覽。 二、第 9 頁圖 2.1 之推力分配如在現場如流大時(2 節以上)再用第 3 頁表 1.1 之規格來操作因其馬力(推進器)$4 \times 1\text{hp}$ 是否夠力。 三、94 年度曾談到電纜預算不夠,現其經費是否已解決了,因在 96 或 97 年就要現場測試了。 四 期中報告中之結果在這不到半年的努力是被肯定的。	二、水下載具的推進力設計原則,是使用 4 具螺槳共同作用,以產生空間 3 維度的推力,以及水平面的旋轉力距。水平面維度所能得到的力量大小需能抗衡 2 節的平面水流。 三、電纜所需經費未編入本年度預算,將以一般電纜先行試驗,電纜之經費希望能編入第三期之經費預算。 四、感謝委員的評論。	二、依處理情形辦理。 三、第三期之經費預算已送審中,擬於第四期之經費預算中編列。 四、符合。
吳基 研究員 一、水下載具之設設計規格是否已考慮海上實際環境,如最大速度定為 0.8m/s,實際操作時有無問題。 二、定位控制系統,如都普勒聲納係針對海底維持定深,側面與被探測結構物之距離如何維持?側推力是否足夠?	一、水下載具之抗流能力,是以螺槳推力減去預估載具在 2 節水流中之阻力,所得之淨推力來決定。此為設計規格,實際的性能須待硬體實驗確認。 二、與探測物結構之距離需以測距聲納量測。規劃之測距聲納將裝置於載具前端左右兩側各一具聲納,以量測載具與探測物結構之距離及它們之相對角度。側推力之足夠與否,亦需待硬體實驗確認。	一、依處理情形辦理。 二、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-95-H2DB009

計畫名稱：水下結構物自動檢測系統研究(2/4)

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 教授 一、本期末報告建立載具螺槳 推力之分配方式，並提出 螺槳配置之動力方程式， 用以控制載具導航感測器 之運動量依據，已為本計 畫之數學理論基礎建構運 動模式。 二、本計畫時程進度之甘特圖 仍宜列出，利於本計畫整 體規畫之參考。 三、載體設計及初步顯示多聲 束聲納等掃描港口防波堤 水下影像已有初步成果， 另建議針對柱狀物之四周 上下部分進行初步測試掃 描影像之操控方式。 四、載具初步設計之壓力測試 是否以規格所定 100m，可 顯示一些測試結果，另載 具與基地連接及通信方式	一、感謝委員的評論。 二、期末報告中，已列入整 體計畫之甘特圖與本 期進度。 三、水下柱狀物周圍觀測 之操控方式，需配備測 距感測器，此工作將在 下期計畫中加以探討 四、由於 100m 測試資料需 要工作船協助，此部分 資料待下一期計畫執 行時即可蒐集。考慮在	一、符合。 二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。 四、依處理情形辦理。

仍需在計畫中說明，符合 AUV 之意義。	結構物邊緣作業之可行性，載具仍應以遙控監視、自主式運動控制的操作模式為主，因此作業時間以纜線相連，可以達到監控之目的。	
黃漢邦 教授 一、圖 2-1 仍不足以描述(2.1)式，應再詳細。 二、Eq (2.2) 與 Eq (2.3) 不一致，另，須注意 A^{-1} 之計算是否正確？ 三、數值模擬應將估測參數列印出來。 四、期末報告大致符合進度。	一、已修改圖 2-1，加入 α 角度之圖示。 二、已修正 Eq(2.3)之表示。已確認 A^{-1} 之計算。 三、已列出估測參數。 四、感謝委員的評論	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、符合。
林顯群 教授 一、本期末報告已完成導航感測器之運動模式，螺槳推力之分配公式等，並提出一個最小平方差估測方法，成功地估算出載具之運動參數；而在載具硬體製作已完成細步設計，潛艇硬體加工，及操控軟體開發。綜合看來，已符合本期計畫之預定進度。 二、本計畫針對港灣水下結構之觀測需求，提出一水下	一、感謝委員的評論。 二、4 個螺槳之設計，是針對主要運動方向（縱	一、符合。 二、依處理情形辦理。

無人載具設計方案，報告中有提“使用四具推進器”可進行直式、縱轉、上下等運動。但未針對其性能特點與現有(市面或文獻)水下載具之不同點做陳述，是否能就本設計之優越特點做具體彙整，並列於報告書中。 三、整體水下載具之外型為何？是否經過(CF1)check？未來是否有規畫作進一步之驗證(CF1)與實驗結果。	移、橫搖)布置2具螺槳，在起伏、測移等受力較小之方向，使用2具螺槳之分力分別操縱，可以減少載具之製作成本，及螺槳之電量消耗。 三、載具外型為開框架式，因為主要運動型態為在固定位置附近做小範圍定位控制，因此在外型上不需針對特定運動方向做減阻設計。	三、依處理情形辦理。
黃明志 教授 一、期末報告包含系統模式鑑定方法之研究與系統原型細步設計二部分，符合進度。 二、P.4 中 F_1、F_2 為 y 方向的推力分量，F_3、F_4 為 x 方向的推力分量，須更正。 三、公式(2-2)與公式(2-3)不一致，需更正。 四、3-6 節數值模擬計算例太少，無代表性。至少應增加前進、起伏上、起伏下、左向橫移等計算例，才稍具代表性。	一、感謝委員的評論。 二、已修正。 三、已修正。 四、已加入前進、起伏上、起伏下、左向橫移等模擬例。	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。

五、觀測作業時，報告中敘述「操作者跟隨載具之運動而移動」，是否代表圖 4.9 之作業工作台與操作者搭載於工作船或卡車上一起移動，在報告中請清楚說明作業模式。	五、因為載具在檢測作業時之移動速度緩慢(約為 0.2 公尺/秒以下)，纜線餘裕長度約為 100 公尺，足以讓操作者之一使用步行緩慢跟隨載具移動。移動時，捲線器跟著移動，但工作平台與捲線器之間有纜線相連，因此工作平台之操作人員不需移動。	五、依處理情形辦理。
曾相茂 研究員 一、今年度的工作報告結果是可肯定的。 二、一般港灣設施水深都在 20 公尺左右，不知本計畫要在 100 公尺，因不同深度其設備費差很多。 三、筆誤如下：(1)第 2 頁倒數第二行細“步”設計為部？(2)第 7 頁第三行軸“系”防水壓設計為係？	一、感謝委員的評論。 二、100 公尺之設定為考量未來工作需要。在 300 公尺深度內，防水元件之成本差別不大。 三、已改正為”細部”。另”軸系”為正確用法。	一、符合。 二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。
吳基 研究員 一、輸入電源及指令之電纜可能長達一、兩百米，實地操作時，其受力會相當大，如僅以一推估之干擾力設計，海上測試是否會發生問題。	一、水下載具之抗流能力，是以螺槳推力減去預估載具在 2 節水流中之阻力，所得之淨推力來決定。此為設計規格，實際的性能須待硬體實驗確認。	一、依處理情形辦理。

二、載具現已完成設計，當初有否評估外型設計採半開架流綫型？以減少海中不確定受力之影響。	二、因載具可以在各自由度小幅運動，因此若採用流綫型外型，反而增加某些自由度之截面，並不利於減少整體之阻力。	二、依處理情形辦理。
--	--	-------------------

附錄三 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(2/4)
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

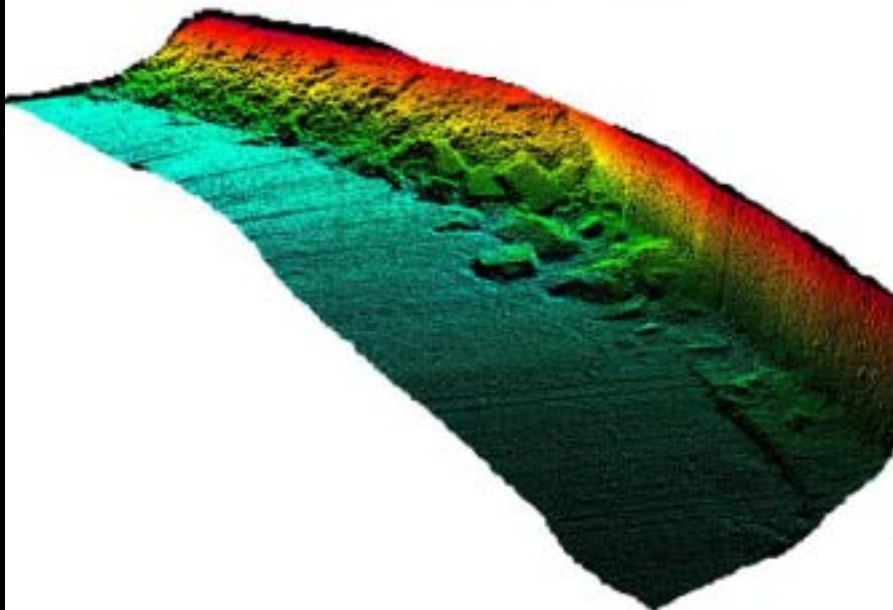
報告大綱

- 研究目的
- 系統規劃
- 動力學模型與參數估測
- 載具製作
- 結論

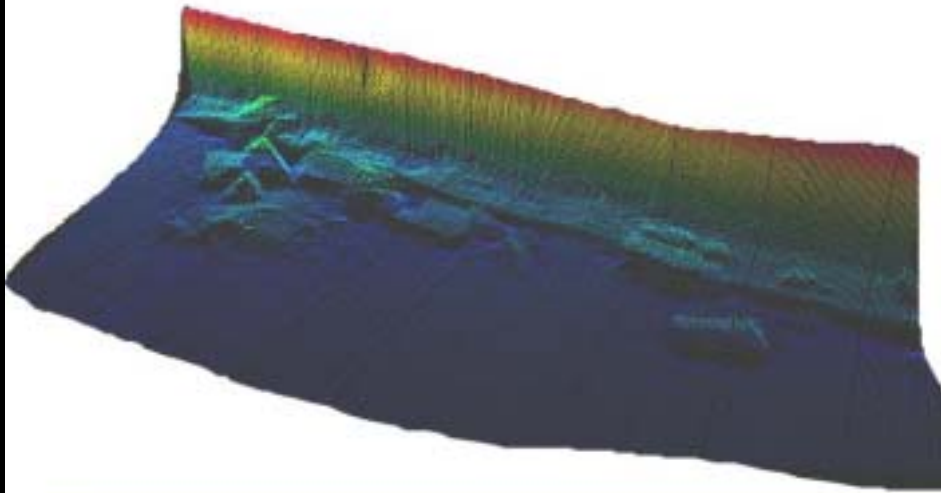
研究目的

- 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。
- 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。

港口水下多聲束聲納影像



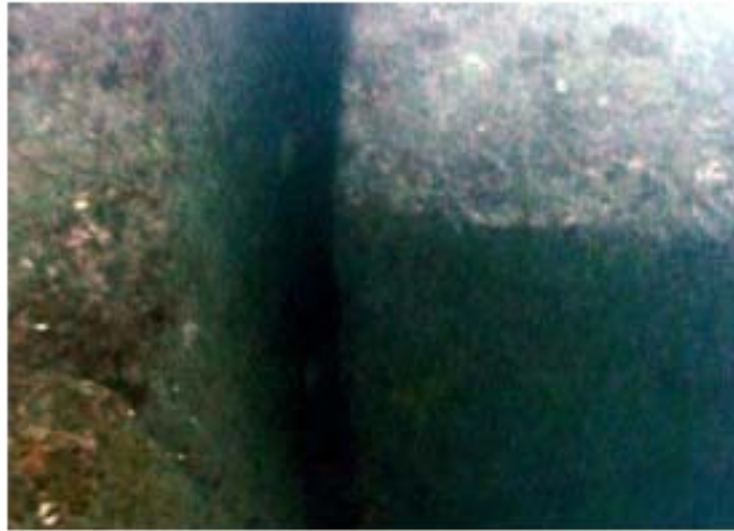
防波堤水下多聲束聲納影像



沈箱間隙之局部光學影像



護基方塊間隙之局部光學影像



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。

系統規劃

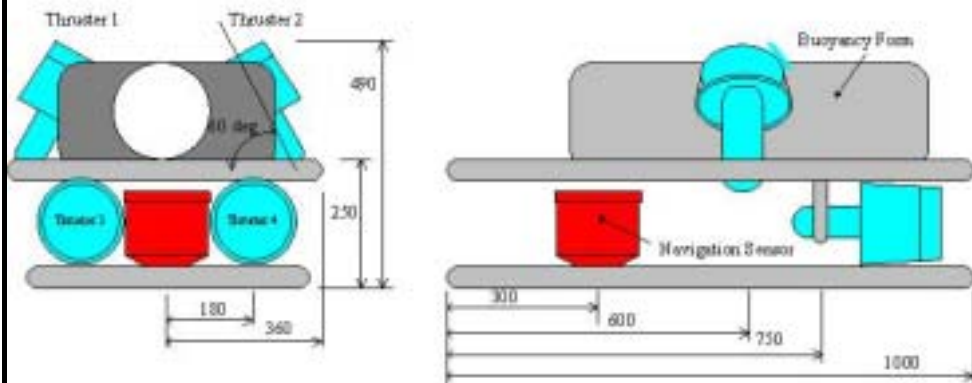
組成之元件及次系統包含：

- 載具本體結構(支架、浮力材、機械轉盤、螺旋槳、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)；

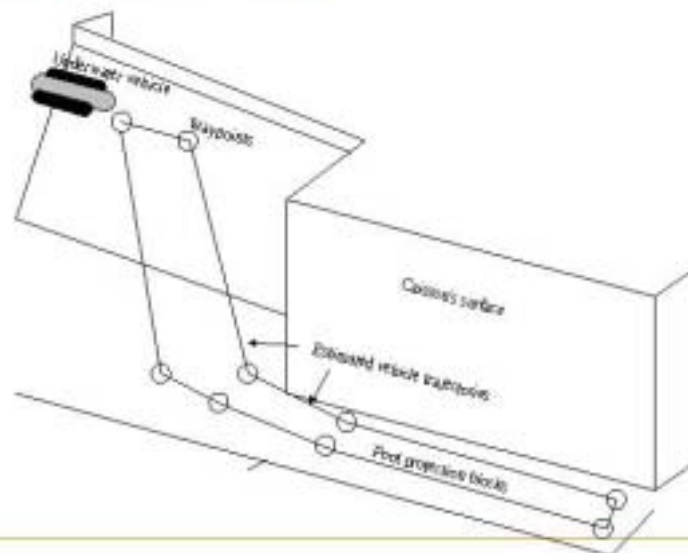
設計規格

項目	規格
外型尺寸	1.0m(L)×0.7m(W)×0.5m(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

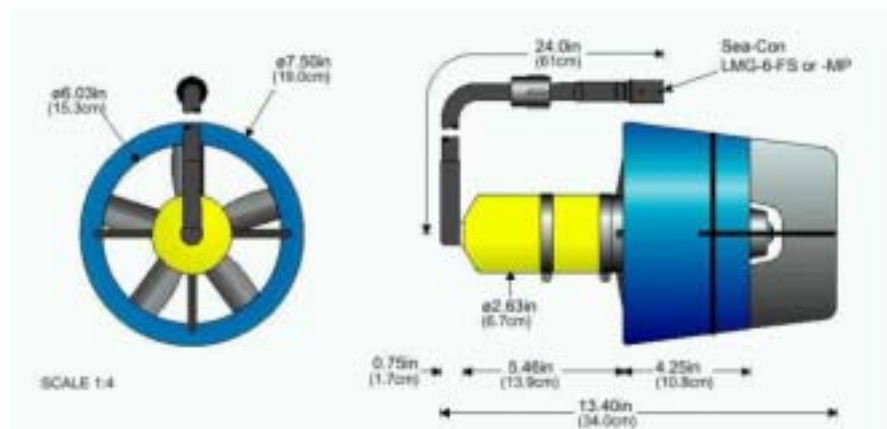
載具外型與主要尺寸



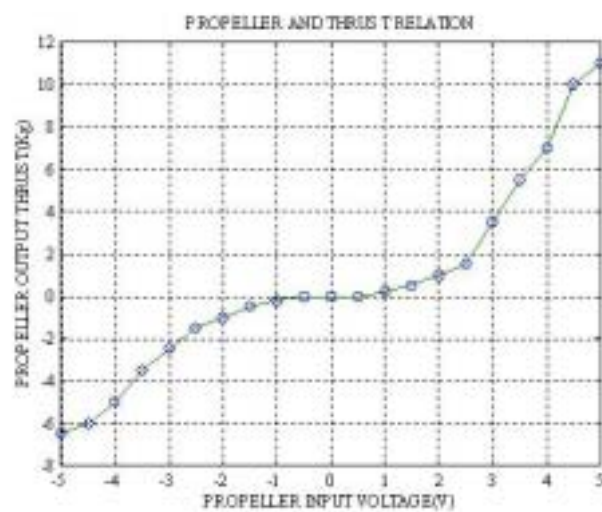
觀測任務示意圖



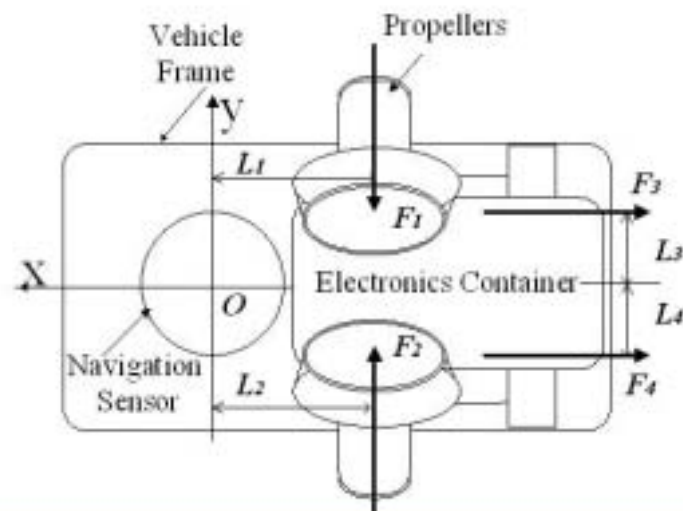
螺槳外型尺寸



螺槳推力



螺旋槳配置



運動方向	推力設定	F_1	F_2	F_3	F_4
縱移	$F_x \neq 0;$ $F_y = M_z = F_z = 0$	0	0	$\frac{-L_4}{L_3 + L_4} F_x$	$\frac{-L_3}{L_3 + L_4} F_x$
橫移	$F_y \neq 0;$ $F_x = M_z = F_z = 0$	$\frac{-0.5}{\cos(\alpha)} F_y$	$\frac{0.5}{\cos(\alpha)} F_y$	$\frac{0.5(L_1 + L_2)}{(L_3 + L_4)} F_y$	$\frac{-0.5(L_1 + L_2)}{(L_3 + L_4)} F_y$
平擺	$M_z \neq 0;$ $F_x = F_y = F_z = 0$	0	0	$\frac{1}{L_3 + L_4} M_z$	$\frac{-1}{L_3 + L_4} M_z$
起伏	$F_z \neq 0;$ $F_x = F_y = M_z = 0$	$\frac{-0.5}{\sin(\alpha)} F_z$	$\frac{-0.5}{\sin(\alpha)} F_z$	0	0

載具數學模式

$$\begin{bmatrix} m_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u|u| \\ v|v| \\ r|r| \\ w|w| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \\ F_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_u \\ n_v \\ n_r \\ n_w \end{bmatrix}$$

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。

縱移運動模式

$$m_u \dot{u} + b_u u + c_u u |u| = \bar{F}_x + n_u$$

$$\bar{F}_x = t_u F_x$$

t_u 為縱移方向之推力減少係數

參數估測

1. 輸入一系列不同數值之常數推力，則參數 b_u 、

c_u 、 t_u 及 n_u 可使用最小平方差法求得。

2. 對操作速度 u^* 做線性化，得到 $m_u \dot{u} + k_L u = \bar{F}x + n_u$

$k_L = b_u + 2c_u |u^*|$ 在常數推力輸入下，量測縱移系統速度響應之時間常數，可間接推算出慣性係數。

起伏運動

$$m_w \dot{w} + b_w w + c_w w |w| = \bar{F}z + W + \Delta W$$

$$\bar{F}z = t_w Fz$$

W 及 ΔW 分別表示載具之淨浮力，以及壓載重量。

淨浮力為正值，而壓載重量是因實驗水域不同而調整。

橫移運動

$$m_v \dot{v} + b_v v + c_v v |v| = \bar{F}y + n_v$$

$$\bar{F}y = t_v^{12} Fy^{12} + t_v^{34} Fy^{34}$$

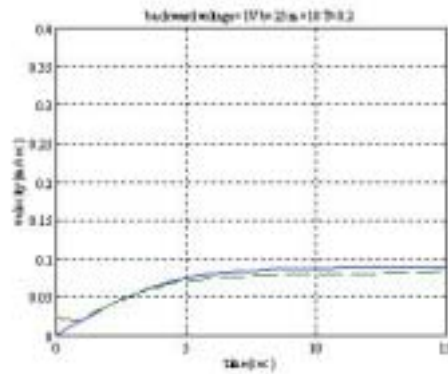
平擺運動

$$I_r \dot{r} + b_r r = t_r Mz + n_r$$

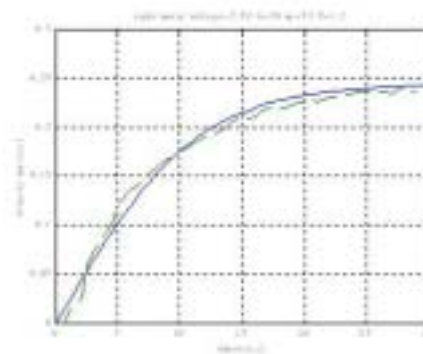
平擺運動將受到最大的纜線外力干擾。所以，平擺運動之系統參數鑑定過程，必須限制載具平擺角度之範圍（例如 $\pm 30^\circ$ ），以免纜線干擾項過大，造成參數估測之不可行。

數值模擬

後退

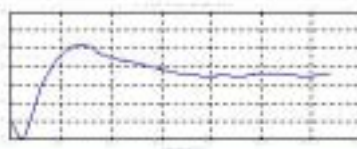
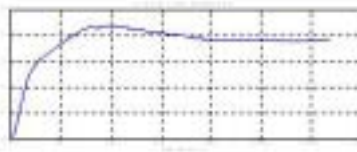
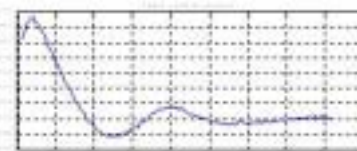


右移

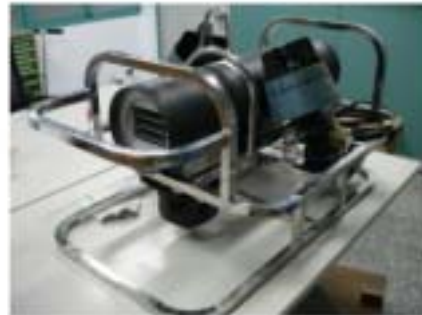


回授控制

- 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。



載具製作



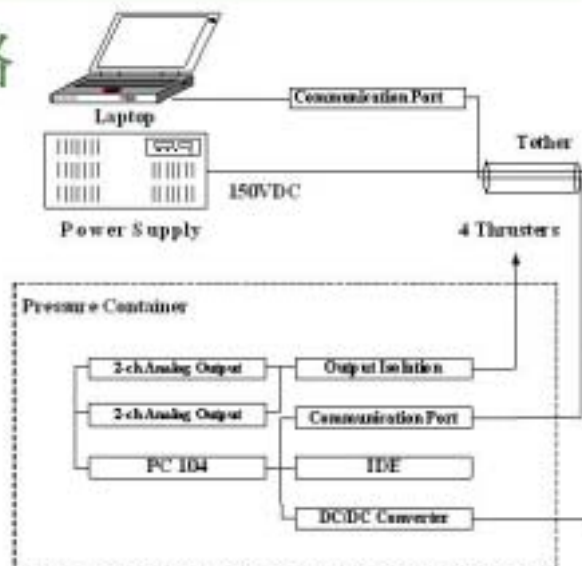
連線測試—操縱搖桿



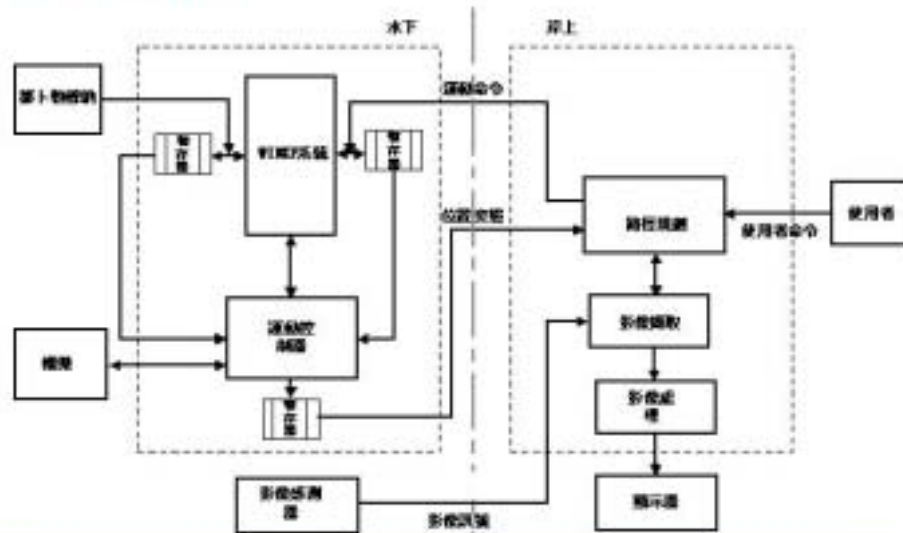
連線測試—運動感測



控制線路



系統架構



結論

- 本期報告已完成運動數學模式之建立、載具系統參數估測的規劃、運動模擬計算程式之撰寫。
- 本期報告已完成載具耐壓外殼、支架、電源及控制電路等之製作組裝，及控制軟體之撰寫。