97-39-7325
MOTC-IOT-96-H2DB009

水下結構物自動檢測系統研究(3/4)

交 通 部 運 輸 研 究 所

中華民國 97 年 3 月

97

水下結構物自動檢測系統研究 (3/4)

交通部運輸研究所

GPN：1009700831
定價：100 元

97-39-7325
MOTC-IOT-96-H2DB009

水下結構物自動檢測系統研究(3/4)

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 97 年 3 月

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.（3/4）/ 邱永芳等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民97.03
面 ; 公分
參考書目:面
ISBN 978-986-01-3878-8(平裝)

1. 港埠工程 2. 海下工程 3. 自動化 4. 機機人

443.029 97006550

水下結構物自動檢測系統研究(3/4)

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 97 年 3 月
印 刷 者：德輝興業有限公司
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港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
五南文化廣場：臺中市中山路 6 號• 電話：(04)22260330

GPN：1009700831　　ISBN：978-986-01-3878-8 (平裝)
著作財產權：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(3/4)

國際標準書號（或叢刊號）	政府出版品統一編號	運輸研究所出版品編號	計畫編號
ISBN978-986-01-3878-8 (平裝)	1009700831	97-39-7325	96-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、施銓熙、徐寶騏、黃盛煒 地址：臺北市羅斯福路 4 段 1 號 聯絡電話：02-33665739	研究期間 自 96 年 03 月 至 96 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，以及研發水下結構物表面觀測作業自動化系統技術。本報告為計畫第三年期之期末報告。本報告建立載具導航運動控制數學模式，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。為建立使用水下載具之港灣防波堤的水下表面觀測作業方法，本研究進行水下載具系統整合與水槽測試：包含電纜及酬載儀器在內的系統設計、軟硬體整合與水槽測試、整合 94,95 年度所製作之原型機各元件，撰寫作業系統軟體程式。在水槽內測試子系統及儀具的功能，並在水槽內確認整體系統的功能正常。並使用數值模擬方法，驗證結構物外形自動追蹤控制之可行性。在載具製作方面，本年度完成潛艇硬體之加工製作、遙控軟體之撰寫、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。未來將完成港灣結構物外形自動追蹤控制之海域實驗、與測掃聲納及多聲束聲納整合之介面設計、發展感測資料融合方法、及施行港灣防波堤的水下表面觀測作業測試。

出版日期	頁數	工本費	本出版品取得方式
97 年 3 月	90	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: A Robotic System for Underwater Structure Inspection (3/4)

ISBN (OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
ISBN978-986-01-3878-8 (pbk)	1009700831	97-39-7325	96-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 2007
TO November 2007

RESEARCH AGENCY: NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Guo, Jen-Hwa
PROJECT STAFF: Chiu, Forng-Chen; Shi, Chuan-Shii; Hsu, Po-Chi; Huang, Sheng-Wei
ADDRESS: No.1, Sec. 4, Roosevelt Road, Taipei 106, Taiwan, R.O.C
PHONE: +886-2-33665739

KEY WORDS:

Underwater robotics, Vehicle, automation

ABSTRACT

The goal of this project is to study the system design issues of an underwater vehicle for the inspection of underwater structure. The technical requirements for the design and the operational procedure of this underwater vehicle are investigated. The underwater vehicle system that has the following functions: 1. Dynamic positioning in water currents; 2. 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 at a long-range for a long-time; 6. Friendly interface to the operator. The approach and research topics corresponding to the above objectives are as follows: 1.Design issues for the underwater vehicle system; 2. Design issues for the control system; 3. Design issues for the man-made 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 robotic systems that are efficient for harbor structure inspection. The advantages expected are that, in addition to being safer and less expensive than divers, this vehicle can be more effective than divers for the harbor inspection tasks.

The report presents what has done in the 3rd year. A method for parameter identification was developed for the vehicle. The vehicle has four thrusters. With proper thrust distribution algorithms, the vehicle is able to move in surge, sway, heave, and yaw directions. The vehicle 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. The least squares method is used to find the values of model parameters. Preview control using distance measurement sonar is used to navigate the vehicle along the profile of an underwater structure. A robust controller is designed for the vehicle. Stability and performance of the control system is discussed. Computer simulations then verify the approach presented here.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION
March 2008	90	100	☐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

1.1 前言·····1-1

1.2 作業系統規劃·····1-2

1.3 第一年期主要成果·····1-4

1.4 第二年期主要成果·····1-4

1.5 本年度工作目標·····1-5

第二章 載具系統設計·····2-1

2.1 載具元件·····2-2

2.2 外形支架及耐壓容器·····2-5

2.3 導航控制·····2-6

2.4 作業平台、工具支架與電源供應器·····2-9

第三章導航與控制器設計·····3-1

3.1 導航·····3-1

3.2 運動控制·····3-5

3.3 導航及控制器模擬·····3-11

第四章 結論·····4-1
參考文獻·····5-1
附錄一 期中報告審查意見處理情形表·····6-1
附錄二 期末報告審查意見處理情形表·····7-1
附錄三 期中簡報資料·····8-1
附錄四 期末簡報資料·····9-1

圖 目 錄

圖 1.1 系統設計概念·····1-3

圖 1.2 拋石觀測任務示意圖·····1-3

圖 2.1 載具外型與主要尺寸·····2-2

圖 2.2 載具外型之(a)側視圖;(b)正視圖;及(c)上視圖·····2-3

圖 2.3 載具之硬體架構·····2-4

圖 2.4 載具之軟體架構·····2-5

圖 2.5 載具之外框·····2-6

圖 2.6 都卜勒聲納·····2-7

圖 2.7 控制電腦、馬達驅動器及電源轉換器·····2-8

圖 2.8 螺槳推進器·····2-9

圖 2.9 作業及載具收納支架·····2-10

圖 2.10 載具及工具支架之整體外觀·····2-11

圖 3.1 水下載具之座標軸·····3-1

圖 3.2 運動控制器方塊圖·····3-8

圖 3.3 水下載具之路徑規劃及控制模擬·····3-14

圖 3.4 路徑規劃及控制模擬之追蹤誤差·····3-14

圖 3.5 路徑規劃及控制模擬之控制力與力矩·····3-15

圖 4.1 規劃中之側掃聲納音鼓外形·····4-2

表 目 錄

表 2.1 載具主要規格·····2-1

表 2.2 都卜勒速度聲納之技術規範·····2-8

表 2.2 磁力式航向角感測儀、傾斜儀、深度計規格·····2-8

表 3.1 所示為各自由度之螺槳電壓指令與推力之關係格·····3-11

表 3.2 載具參數估測數值·····3-12

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，以建立屬於臺灣自主的技術能力應是迫切且極具意義的。

1.2 作業系統規劃

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：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 1.2 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。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。

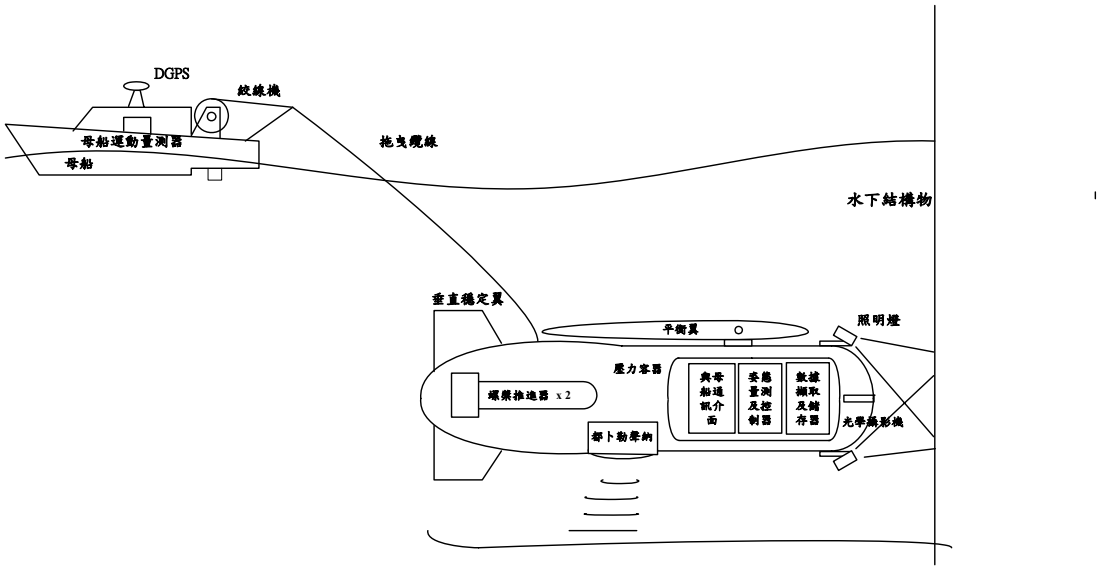


圖 1.1 系統設計概念

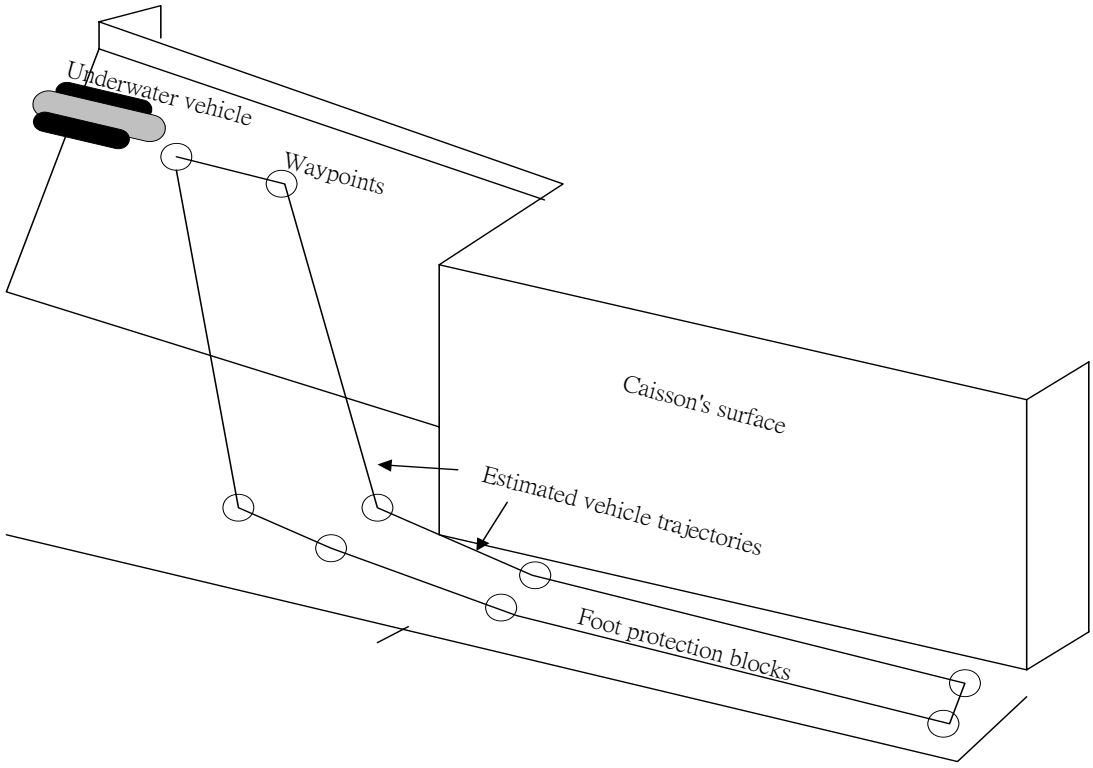


圖 1.2 拋石觀測任務示意圖

1.3 第一年期主要成果[7]

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。

1.4 第二年期主要成果[8]

本計畫第二年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。

1.5 本年度工作目標

本年度工作項目與主要內容如下：

水下載具系統整合與水槽測試：包含電纜及酬載儀器在內的系統設計、軟硬體整合與水槽測試、發展港灣水下結構物觀測作業系統所需之軟硬體整合介面、與測掃聲納及多聲束聲納整合之介面設計、發展感測資料融合方法、港灣防波堤的水下表面觀測作業測試。整合94,95 年度所製作之原型機各元件，撰寫作業系統軟體程式。在水槽內測試子系統及儀具的功能，在水槽內確認整體系統的功能正常。施行港灣防波堤的水下表面觀測作業試驗。

第二章 載具系統設計

本計畫設計之水下遙控載具，其組成之元件及次系統包含: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、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 130 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 2.1 所示。

表 2.1 載具主要規格

Items	Specifications
Dimensions	1.0m(L)×0.8m(W)×0.5m(H)
Weight	80kg in air
Tether length	130m
Speed	0.8 m/s
Payload	3 kg (adjustable)
Thrusters	1 hp x 4
Sensors	video camera; side scan sonar
Navigation	Doppler log
Power	110VAC, 50/60 Hz, 10 Amps： 220VAC, 50/60 Hz, 20 Amps

2.1 載具元件

圖 2.1 為本計畫製作中之水下無人載具本體之外型與主要尺寸。載具之三面視圖如圖 2.2 所示。載具的硬體架構如圖 2.3 所示，其軟體規劃如圖 2.4 所示。各組成元件之說明如下：

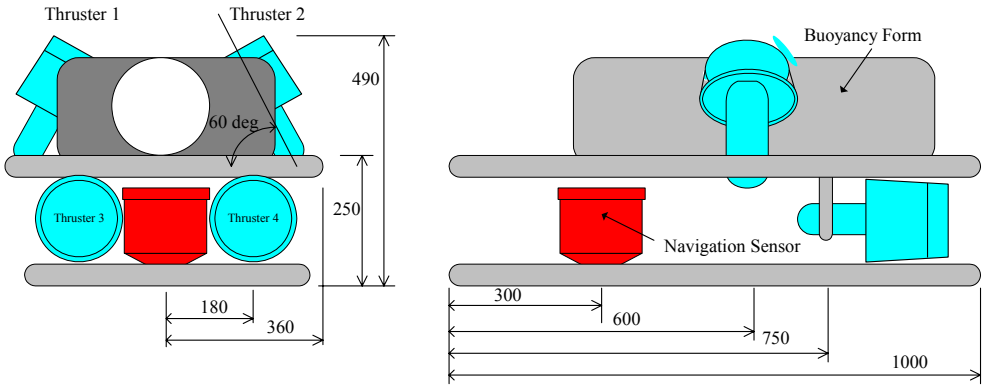
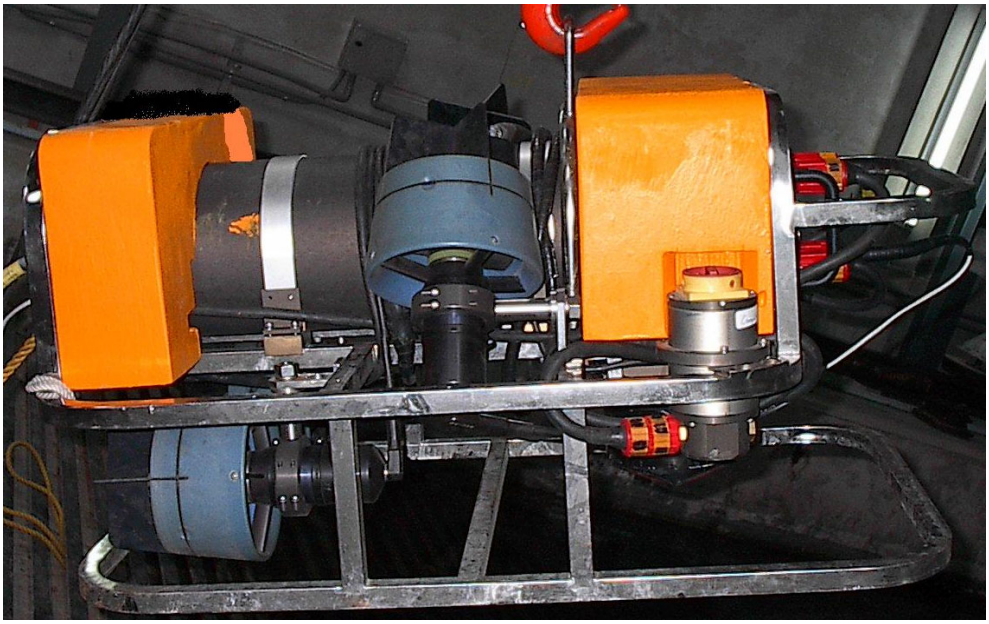
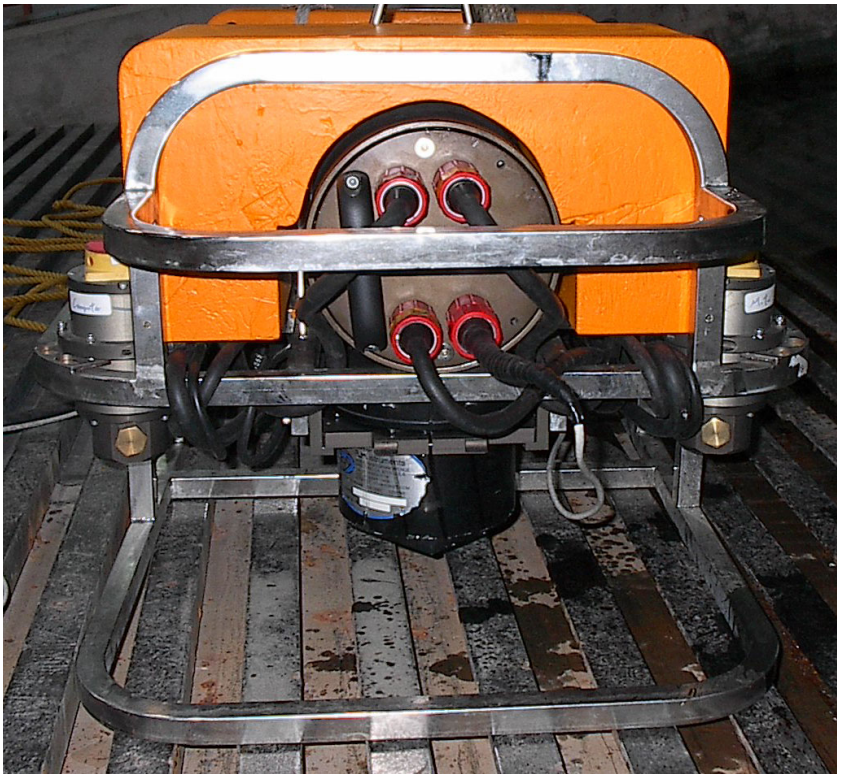


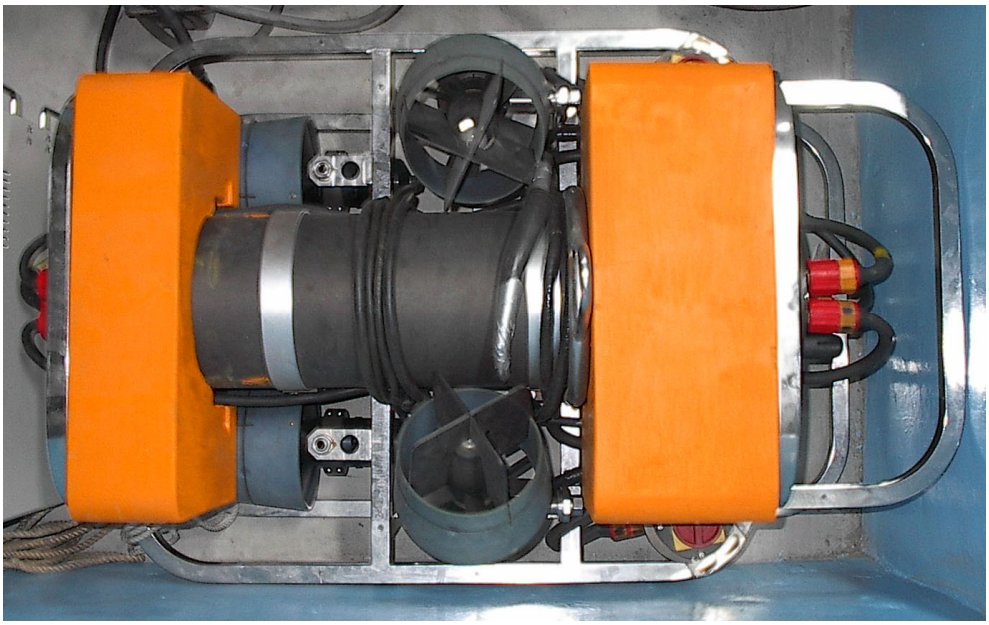
圖 2.1 載具外型與主要尺寸



(a)



(b)



(c)

圖 2.2 載具外型之(a)側視圖; (b)正視圖; 及(c)上視圖

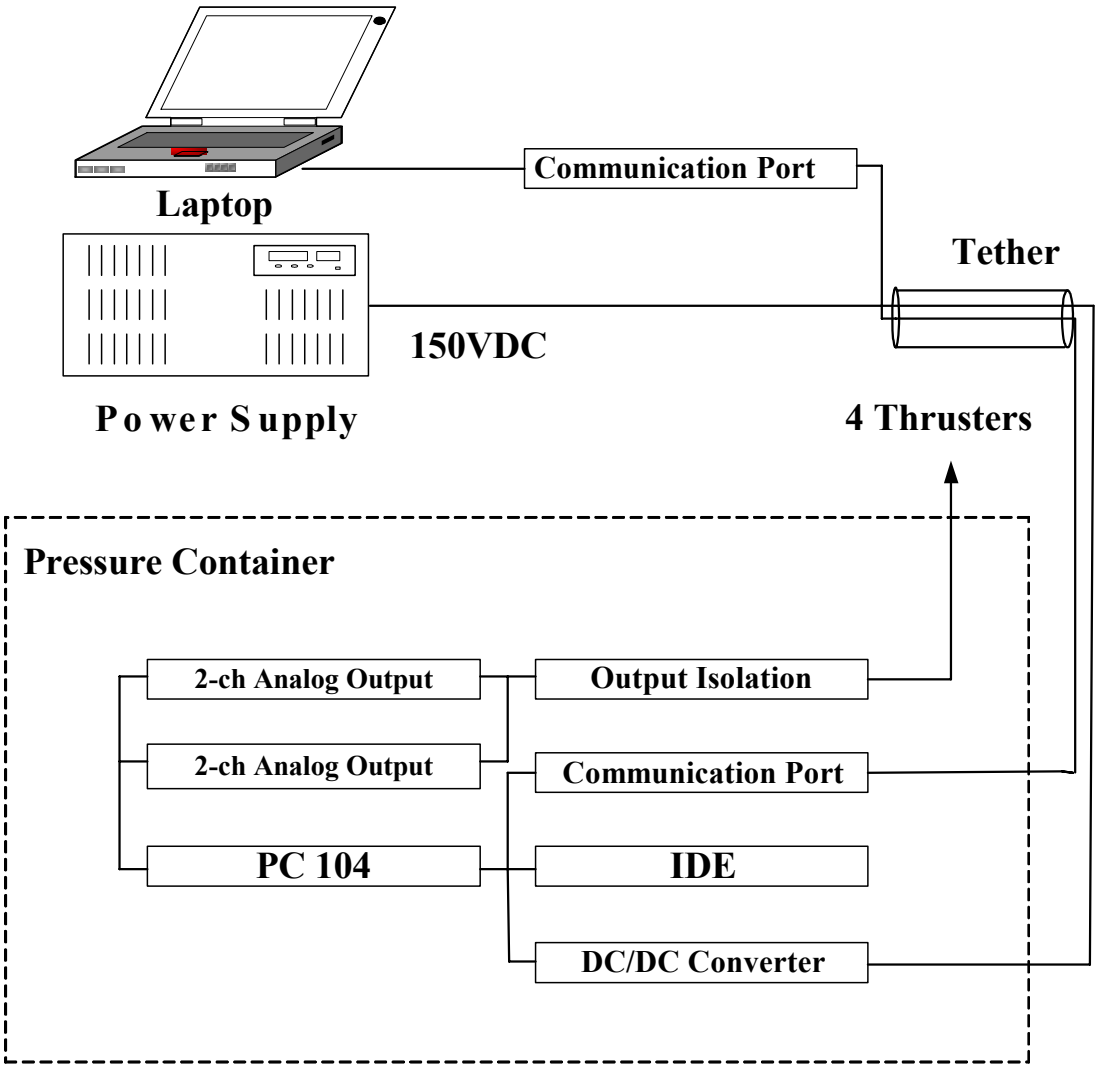

Laptop
Communication Port
Tether
150VDC
Power Supply
4 Thrusters
Pressure Container
2-ch Analog Output
2-ch Analog Output
PC 104
Output Isolation
Communication Port
IDE
DC/DC Converter

圖 2.3 載具之硬體架構

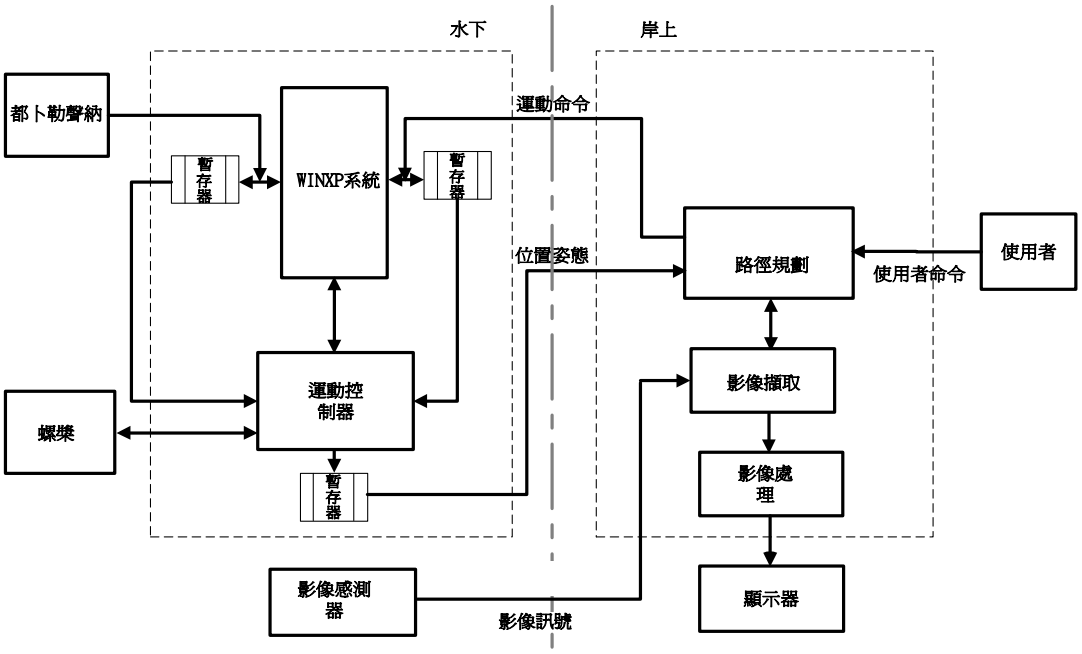


圖 2.4 載具之軟體架構

2.2. 外型支架及耐壓容器

載具的外框及儀器支架如圖 2.5 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：

a. 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。

b. 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。

c. 浮力材: 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浮力的差異。浮力

材必須重量小而浮力大，本計畫採用的是高強度合成發泡材。

圖 2.5 載具之外框

2.3 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 2.6 所示。控制電腦為工業用電腦、相關控制界面包含 DAC 2 channel card 及 4 軸訊號隔絕電路（圖 2.7）皆置於耐壓容器中。載具運動則由 4 具螺槳推進器（圖 2.8）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 2.2 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 2.3 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。

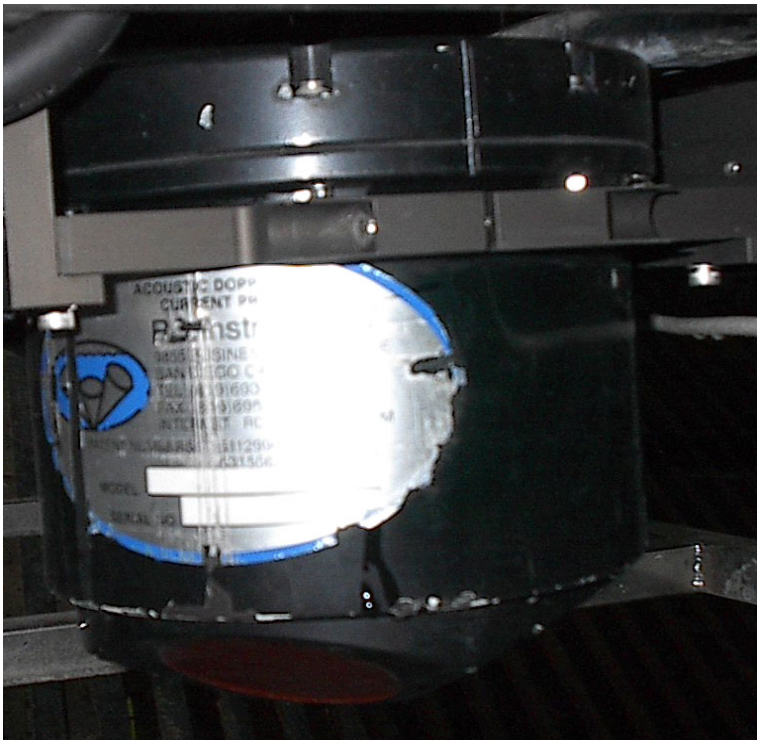


圖 2.6 都卜勒聲納

表 2.2 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 2.3 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%	

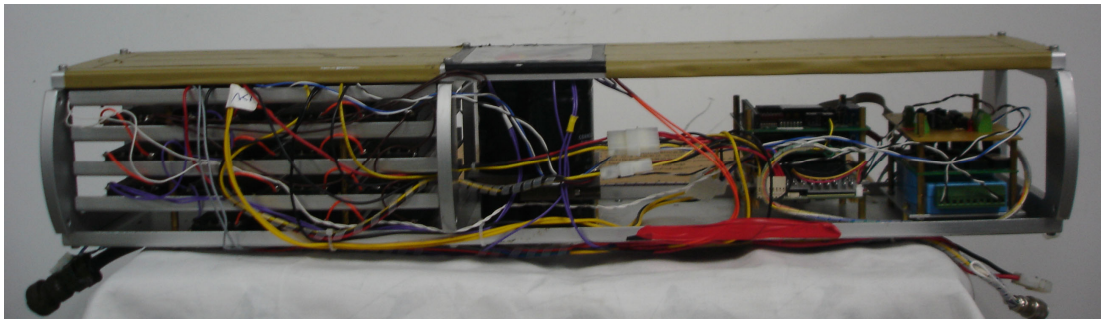


圖 2.7 控制電腦、馬達驅動器及電源轉換器

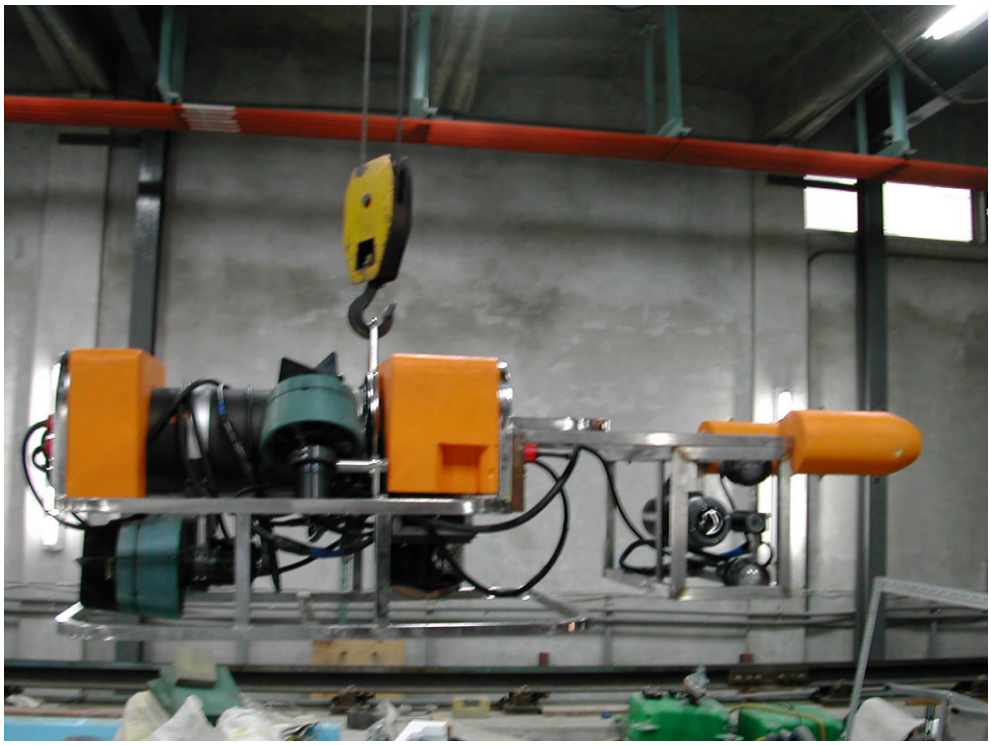
圖 2.8 螺槳推進器

2.4 作業平台、工具支架與電源供應器

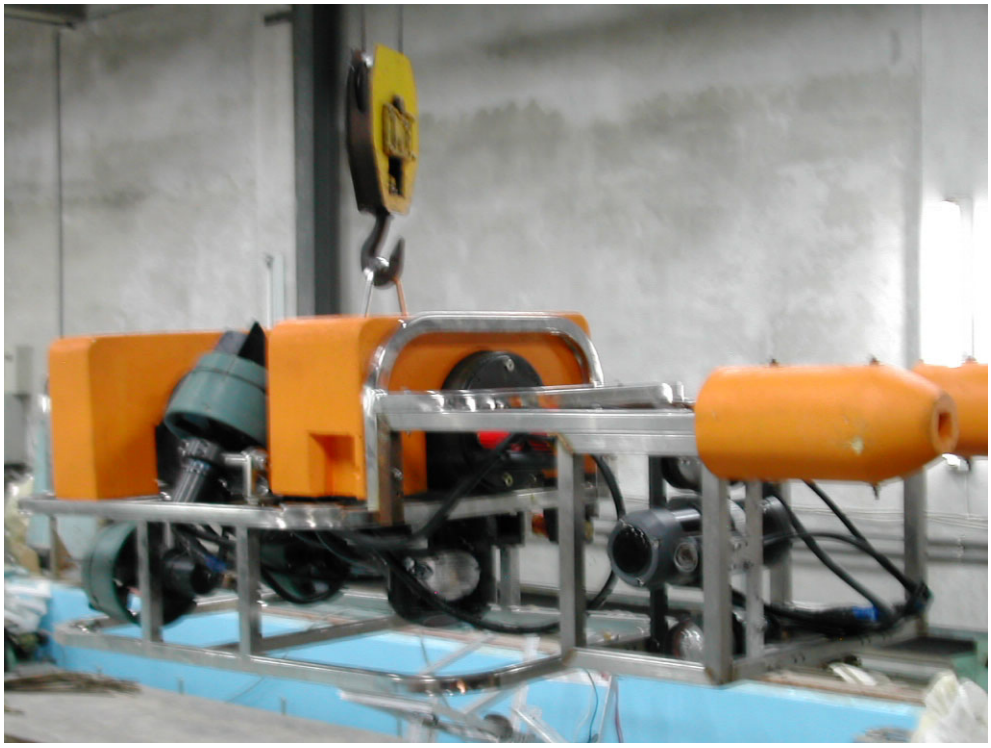
載具之搬運、作業時人機界面放置之場所、電源及修護工具之提供等需要一專用之收納空間，本計畫所製作之載具工作台及收納支架如圖 2.9 所示。作業時需要以小型工作船或小型卡車擔任支援工作，以人力將載具吊放至水中，作業結束時亦使用人力回收載具。

電源之供應，由圖 2.9 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 2.10(a)、(b)分別為水下載具附加工具支架後的外觀。工具支架在水中具有淨浮力，其寬度為 70 公分，長度為 80 公分，支架負載之儀器位置可調整。圖示之工具支架上所固定者為攝影機、燈光、以及測距聲納。

圖 2.9 作業及載具收納支架



(a)



(b)

圖 2.10 載具及工具支架之整體外觀

第三章 導航與控制器設計

3.1 導航

ROV 使用三個座標系來描述空間運動，一為空間固定座標系 U (earth-fixed coordinate system)，另外兩個為載具座標系 B (vehicle-fixed coordinate system)，和參考路徑之座標系 R(reference frame system)，如圖 3.1 所示。 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。

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**p**. **p** 為時間 t 的函數。

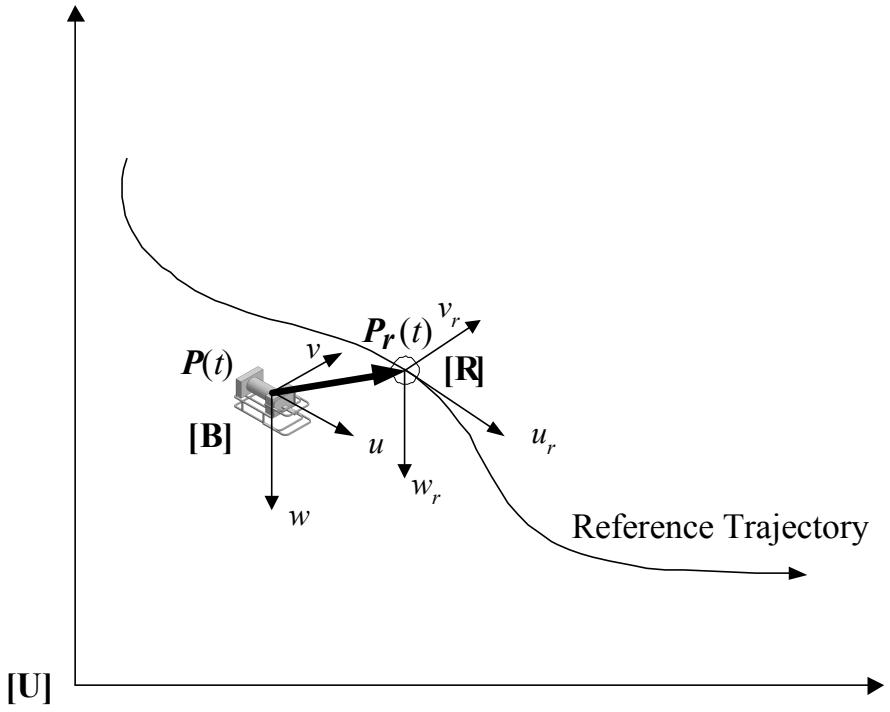


圖 3.1 水下載具之座標軸

$$\mathbf{p}=\begin{bmatrix} x \\ y \\ \psi \\ z \end{bmatrix} \tag{3-1}$$

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

$$\dot{\mathbf{p}}=\begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\mathbf{q} \tag{3-2}$$

上式中 $\mathbf{q}=[u \quad v \quad r \quad w]^{\mathrm{T}}$。 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 $\mathbf{p}_r=\begin{bmatrix}x_r & y_r & \psi_r & z_r\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，而載具實際的姿態為 $\mathbf{p}$。則姿態誤差 $\mathbf{p}_e$ 可定義為：

$$\begin{aligned}\mathbf{p}_e=\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \psi_e \\ z_e \end{bmatrix}&=\begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}(\mathbf{p}_r-\mathbf{p})=\mathbf{T}_e(\mathbf{p}_r-\mathbf{p}) \\ &=\begin{bmatrix} \cos\psi(x_r-x)+\sin\psi(y_r-y) \\ -\sin\psi(x_r-x)+\cos\psi(y_r-y) \\ \psi_r-\psi \\ z_r-z \end{bmatrix}\end{aligned} \tag{3-3}$$

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定義於載具座標系之上。根據上述$\mathbf{p}_r$與$\mathbf{p}$的定義，可求得$\dot{\mathbf{p}}_e$。

$$\dot{\mathbf{p}}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{z}_e \\ \dot{\psi}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\psi} y_e + u_r \cos\psi_e - u \\ -\dot{\psi} x_e + u_r \sin\psi_e - v \\ w_r - w \\ r_r - r \end{bmatrix} \tag{3-4}$$

為了追隨港灣結構物外型，必須即時量測結構物位置，做為ROV追隨的參考路徑。平滑的參考路徑較利於ROV自動控制下之運動穩定性，為確保規劃的路徑是平順的參考路徑，本計畫使用 B-spline 擬合，根據載具測距聲納即時量測到的結構物外型，規劃載具之追隨參考路徑，保持參考路徑平滑，卻又不失去原有結構物的輪廓。

B-spline曲線具有局部數據點控制的能力，可在不改變曲線階數下，增加曲線的控制點。B-spline曲線數學模式簡述如下：

若$\mathbf{c}(l)$為曲線上的位置向量，則沿著參數l的B-spline曲線可定義為

$$\mathbf{c}(t) = \sum_{i=0}^{N} \mathbf{c}_i B_{i,k}(l) \qquad l_0 \le l < l_N, \qquad 2 \le k \le N$$

（3-5）

其中l 為參考路徑之長度參數，$\mathbf{c}_i$為控制點位置向量，個數為$N+1$。$B_{i,k}(l)$則是正規化的B-spline基底函數，在階數為k時，第i個基底函數$B_{i,k}(l)$定義為

$$B_{i,1}(l)=\begin{cases}1 & \text{if} \quad l_i \le l < l_{i+1}\\ 0 & \text{otherwise}\end{cases}$$

及

$$B_{i,k}(l)=\frac{(l-l_i)B_{i,k-1}(t)}{l_{i+k-1}-l_i}+\frac{(l_{i+k}-l)B_{i+1,k-1}(l)}{l_{i+k}-l_{i+1}} \tag{3-6}$$

上式中，l_i 為節點向量(knot vector)中的第 i 個元素，且 $l_i \le l_{i+1}$， $l_0 \le l \le l_N$。

載具上裝配了都卜勒聲納和測距聲納，都卜勒聲納即時得知載具的速度及位置，可推估測距聲納的位置，及載具與障礙物的距離，藉由以上的資訊則可計算擬合出障礙物的輪廓，有了障礙物的座標位置即可以規劃安全的平移距離，進而得到參考路徑。參考路徑演算法簡述如下：

1. 儲存載具上感測器收到的資料，測距聲納置於載具座標原點一公尺之前，以固定的時間間格量取結構物外形資料；如當載具前進的速度為 0.25 m/s，則每四秒可規劃一段路徑，作為未來的參考路徑。

2. 依據取得的資料點經由 B-spline 曲線擬合，以座標點 $\mathbf{c}(l)=[x(l)\ \ y(l)]^T$ 呈現出障礙物的輪廓。

3. 考慮曲率過大的凹入型結構物外形，其偏移點所形成之路徑控制點可能互相重疊，所以需移除曲率過大的資料點。

4. 設定偏移量為 s_D，將曲線資料點作安全距離的偏移以及計算水平面之偏移的法向量。法向量之計算式為：

$$\mathbf{n}(l)=\frac{1}{\sqrt{x'(l)^2+y'(l)^2}}\begin{bmatrix}x'(l)\\ -y'(l)\end{bmatrix} \tag{3-7}$$

上式中，$x'(l)$、$y'(l)$是 B-spline 曲線在路徑長度參數方向的微分式。經 B-spline 曲線擬合之參考路徑如下式：

$$\mathbf{c}_r(l) = \mathbf{c}(l) + s_D\mathbf{n}(l) \tag{3-8}$$

由上面計算規劃的參考路徑座標點，可將參考路徑轉換成路徑長度參數(l_r)的函數，即$\mathbf{c}_r(l_r) = (x(l_r), y(l_r))$，進而計算參考路徑座標系中之曲率$\kappa_r$、角速度$r_r$、與參考角位置$\psi_r$。

$$\kappa(l_r) = \frac{x''(l_r)y'(l_r) - y''(l_r)x'(l_r)}{(x'(l_r)^2 + y'(l_r)^2)^{3/2}} \tag{3-9}$$

$$r_r = \kappa(l_r)u_r \tag{3-10}$$

$$\psi_r(l_r) = \text{atan2}(x'(l_r), y'(l_r)) \tag{3-11}$$

3.2 運動控制

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。載具動態模型可表示如下：

$$\mathbf{f}_0 = \mathbf{M}_0\ddot{\mathbf{p}}_c - \mathbf{C}_0\dot{\mathbf{p}}_c - \mathbf{D}_0\dot{\mathbf{p}}_c - \mathbf{t}_0 - \mathbf{g}_0 \tag{3-12}$$

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。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。

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 來當作螺槳馬達的命令值。控制器的設計，主要的目的，是利用 P-D(比例-微分)加上誤差補償的方法，來對系統的做控制。載具之動力方程式，可分為以下三個部分：

1. 動力模型 $\mathbf{f}_0$
2. 回授 $\mathbf{f}_f$
3. 誤差補償 $\mathbf{f}_L$

則載具之控制力可表示為

$$\mathbf{f}_c = \mathbf{f}_0 + \mathbf{f}_f + \mathbf{f}_L \tag{3-13}$$

$\mathbf{f}_f$ 回授由 P-D 控制法所構成。

$$\mathbf{f}_f = -\mathbf{K}_p\mathbf{p}_e - \mathbf{K}_D\dot{\mathbf{p}}_e \tag{3-13}$$

P-D 控制器相當於原系統加入一個非零的零點，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。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。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。為了降低穩態誤差，另加入一非線性函數**n**於迴授路徑中：

$$\mathbf{f}_L = -\mathbf{K}_L\mathbf{n}(\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{w}) \tag{3-15}$$

n函數為任意片段連續函數，並且符合以下兩點描述：

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

$$(2)\ \|\mathbf{n}(\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{w})\| \geq 1 - \boldsymbol{\varepsilon} \big/ \|\mathbf{w}\| \quad , \quad \|\mathbf{w}\| > \boldsymbol{\varepsilon} \tag{3-16}$$

當 $-\boldsymbol{\varepsilon} \leq \mathbf{w} \leq \boldsymbol{\varepsilon}$ 的時候，$\mathbf{n}=0$，補償項 $\mathbf{f}_L$ 沒有作用。$\mathbf{f}_L$ 之功能為消除因為系統動態的不確定性所造成的載具控制誤差，可改善穩態誤差。運動控制器架構如圖 3.2 所示。

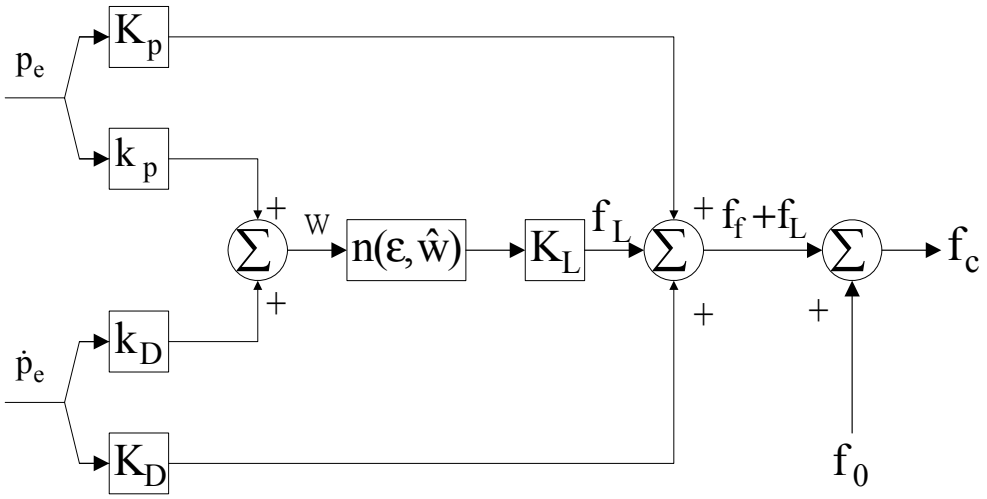


圖 3.2 運動控制器方塊圖

控制系統誤差之動態可以經由前述運動模式與控制力之定義求得：

$$\ddot{\mathbf{p}}_e = \mathbf{M}_0^{-1}(-\mathbf{K}_p\mathbf{p}_e - \mathbf{K}_D\dot{\mathbf{p}}_e - \mathbf{K}_L\mathbf{n}(\boldsymbol{\varepsilon},\hat{\mathbf{w}}) + \mathbf{h}) \tag{3-17}$$

其中**h**為模式誤差、控制推力誤差、與外擾力之總和。定義一誤差向量如下：

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_e \\ \dot{\mathbf{p}}_e \end{bmatrix} \tag{3-18}$$

則

$$\dot{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_e \\ \ddot{\mathbf{p}}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_e \\ \mathbf{M}_0^{-1}(-\mathbf{K}_p\mathbf{p}_e - \mathbf{K}_D\dot{\mathbf{p}}_e - \mathbf{K}_L\mathbf{n}(\boldsymbol{\varepsilon},\hat{\mathbf{w}})) + \mathbf{h} \end{bmatrix} \tag{3-19}$$

根據**e**所定義之 Lyapunov 函數可表示為

$$V(\mathbf{e}) = \tfrac{1}{2}\mathbf{e}^T\mathbf{P}\mathbf{e}\text{，}\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_L & \mathbf{k}_p \\ \mathbf{k}_p & \mathbf{k}_D \end{bmatrix} \tag{3-20}$$

P為一正定矩陣，則$V(\mathbf{e})$具有以下性質之系統為穩定。

$$(1)\, c_1 |\mathbf{e}|^2 \le V(\mathbf{e}) \le c_2 |\mathbf{e}|^2 \text{，} c_1, c_2 > 0$$

$$(2)\, \dot{V}(\mathbf{e}) \le -2\alpha[V(\mathbf{e}) - V^*] \text{，} V(\mathbf{e}) > V^* \tag{3-21}$$

上述不等式式中，$c_1 = y_{\min}$，$c_2 = y_{\max}$；$y_{\min}$以及$y_{\max}$分別為 P 之最小及最大的特徵值。

定義

$$\mathbf{k}_D = 2\alpha\mathbf{I}$$

$$\mathbf{k}_P = 2\alpha^2\mathbf{I}$$

$$\mathbf{k}_L = 4\alpha^3\mathbf{I} \tag{3-22}$$

$$E = \mathbf{w}^T[\mathbf{M}_0^{-1}\mathbf{h} - \mathbf{M}_0^{-1}\mathbf{K}_L\mathbf{n}(\boldsymbol{\varepsilon}, \hat{\mathbf{w}})] \text{，} \mathbf{w} = \mathbf{k}_p\mathbf{p}_e + \mathbf{k}_D\dot{\mathbf{p}}_e \tag{3-23}$$

使用上述定義，可推求$V(\mathbf{e})$的時間微分，

$$\dot{V}(\mathbf{e}) = \mathbf{e}^T \mathbf{P}\dot{\mathbf{e}}$$
$$= -2\alpha V(\mathbf{e}) + E$$

若E有一上界$\overline{E}$，則

$$V^* = \overline{E} \big/ 2\alpha \tag{3-24}$$

為使不確定因素不影響載具的控制穩定性，設定

$$\mathbf{k}_L = \mathbf{M}_0^{-1}\mathbf{K}_L \tag{3-25}$$

為不確定項$\overline{\mathbf{h}} = \mathbf{M}_0^{-1}\mathbf{h}$之最大值。則$E$可改寫為

$$E = \hat{\mathbf{w}}\,(\overline{\mathbf{h}} - \mathbf{k}_L\mathbf{n}(\boldsymbol{\varepsilon}, \hat{\mathbf{w}})) - \delta\mathbf{w}(\overline{\mathbf{h}} - \mathbf{k}_L\mathbf{n}(\boldsymbol{\varepsilon}, \hat{\mathbf{w}})) \tag{3-26}$$

其中，$\mathbf{w}$估測值等於實際測量值加上感測器誤差值，$\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{w} + \delta\mathbf{w}$將$\mathbf{n}$函數用$\mathbf{I} - \boldsymbol{\varepsilon} \big/ \|\hat{\mathbf{w}}\|$替代，可得$\overline{E}$的範圍如下：

$$\overline{E} \le \mathbf{k}_L(\boldsymbol{\varepsilon} + 2\delta\overline{\mathbf{w}})，\delta\overline{\mathbf{w}} \ge \delta\mathbf{w} \tag{3-27}$$

控制系統性能的極限，$\overline{E}$受限於載具模式的不確定性、螺槳馬達的推力誤差、感測器的雜訊等。而追蹤誤差大小為指數收斂，並且趨近於

$\sqrt{V^* \big/ y_{\min}}$。

$$|\mathbf{e}| \le \sqrt{V^* / y_{\min}} + \sqrt{[V(t_0) - V^*)] / y_{\min}} \exp(-\alpha(t - t_0)) \qquad (3\text{-}28)$$

3.3 導航及控制器模擬

計畫規劃之水下載具，由於開框架載具的形狀不對稱，因此在不同的運動本方向及運動速度下，會導致不同的動態反應。本節以運動方程式描寫載具在各方向的運動，並以水槽實驗數據建立載具水平面及垂直面之模式係數，表示水下載具之開回路系統動態，以做為動態模擬的基礎。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：

$$\begin{bmatrix} m_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{\dot{v}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{u|u|} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{v|v|} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{w|w|} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{r|r|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u|u| \\ v|v| \\ w|w| \\ r|r| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u \\ f_v \\ f_w \\ f_r \end{bmatrix} \qquad (3\text{-}29)$$

上式中，$b_{u|u|}$、$b_{v|v|}$、 $b_{w|w|}$、 $b_{r|r|}$ 為二次阻尼係數， b_u、b_v、 b_w 及 b_r 線性阻尼係數，$m_{\dot{u}}$、$m_{\dot{v}}$、 $m_{\dot{w}}$ and $I_{\dot{r}}$ 分別為 surge、 sway、 heave 與 yaw 方向的質量、慣性矩。 f_u,、f_v,、f_w 及 f_r 表示推進力、推進力矩。

表 3-1 所示為各自由度之螺槳電壓指令與推力之關係。

Voltage	Surge (N)	Sway (N)	Heave (N)	Yaw ($N \cdot m$)
0.7 (*volts*)	1.56	0.39	1.35	0.29
0.8 (*volts*)	2.35	0.58	2.03	0.43

0.9 (*volts*)	3.13	0.78	2.71	0.58
1 (*volt*)	3.92	0.98	3.39	0.72
1.5 (*volts*)	9.81	2.45	8.49	1.81
3 (*volts*)	68.67	17.16	59.46	12.70

表 3-2　載具參數估測數值

Parameter	Estimated value
$b_u^+ \ (N\frac{s}{m})$	4.26
$b_{u\|u\|}^+ \ (N\frac{s^2}{m^2})$	46.07
$b_u^- \ (N\frac{s}{m})$	9.547092
$b_{u\|u\|}^- \ (N\frac{s^2}{m^2})$	62.26
$b_v^+ \ (N\frac{s}{m})$	5.95
$b_{v\|v\|}^+ \ (N\frac{s^2}{m^2})$	514.57
$b_v^- \ (N\frac{s}{m})$	3.59
$b_{v\|v\|}^- \ (N\frac{s^2}{m^2})$	327.89
$b_w^+ \ (N\frac{s}{m})$	10.55
$b_{w\|w\|}^+ \ (N\frac{s^2}{m^2})$	63.49

b_w^- $(N\frac{s}{m})$	10.70
$b_{w\|w\|}^-$ $(N\frac{s^2}{m^2})$	219.71
b_r^+ (Nms)	1.76
$b_{r\|r\|}^+$ (Nms^2)	6.51
b_r^- (Nms)	0.76
$b_{r\|r\|}^-$ (Nms^2)	11.15

表 3-2 所示為根據水槽實驗數據所鑑定的系統模式參數。上標‘+’及’-‘分別表示參數的正方向、負方向的運動數據。依據本章所建立之導航及控制方式，設定工作環境中有一結構物外形曲線如圖 3.3 所示，載具之導航與控制結果顯示其可以追蹤結構物外形。參考速度設定為 u_r=0.2 m/s，載具使用前置之測距聲納規劃一平滑之參考路徑，控制器則可以將誤差限制在小距離內。圖 3.4 及圖 3.5 所示為控制過程中的誤差與控制力之時間歷程。本導航控制器之效能將在近日以海域實驗確認。

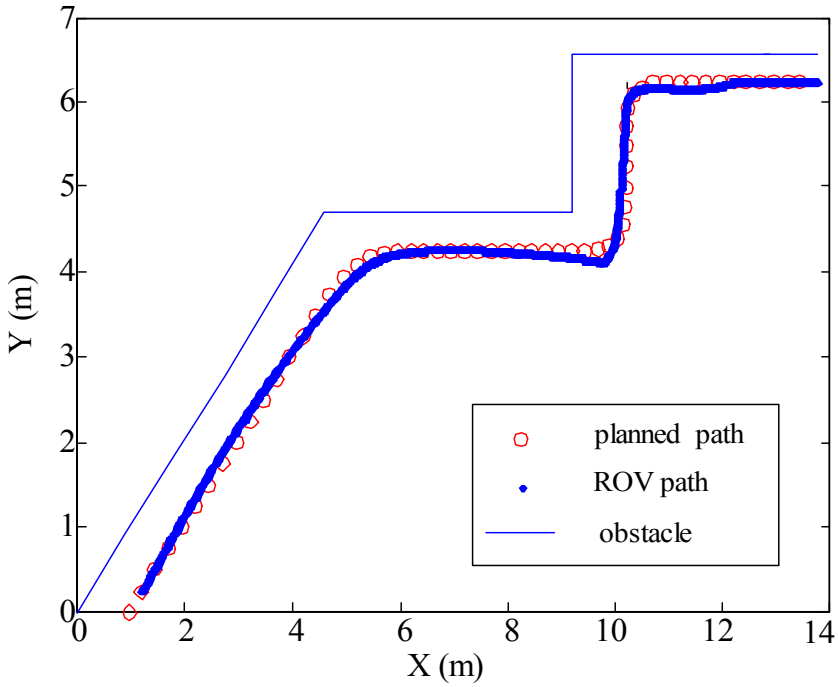


圖 3.3 水下載具之路徑規劃及控制模擬

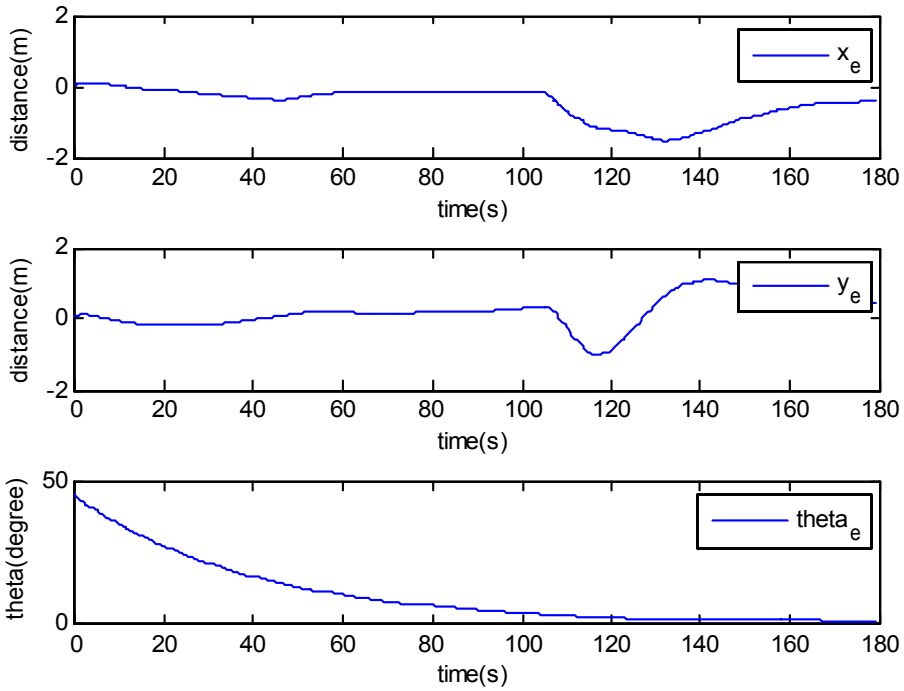


圖 3.4 路徑規劃及控制模擬之追蹤誤差

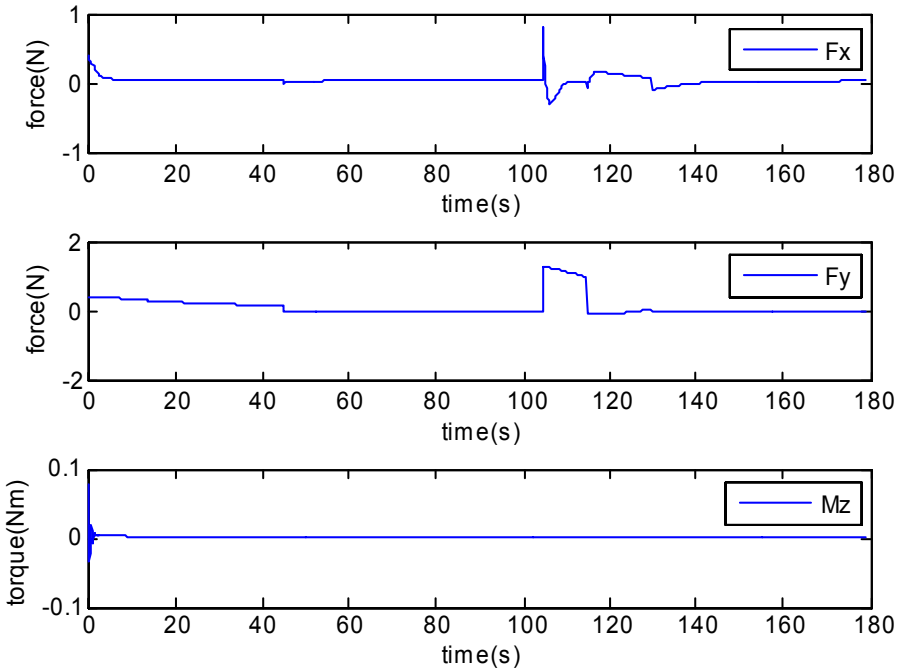


圖 3.5 路徑規劃及控制模擬之控制力與力矩

第四章 結 論

本年度計畫之主要成果為：1.水下載具系統整合與水槽測試。本年度完成載具本體與工具支架之整合測試。工具支架安裝之儀器為水下攝影機、燈光與測距聲納。2.提出載具追隨港灣結構物外形之導航控制架構。本計畫所發展的導航運動控制方式為一穩定的控制器。根據系統性能參數α與 P-D 控制增益之關係式，可以決定出控制增益，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。

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。假設各維度運動範圍有限，且都在低速下運動，因此將各維度運動視為各自獨立，定義各維度之運動模式及相關參數。由於各維度之運動模式需要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。本報告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，以供運動控制器設計之用。運動控制使用比例微分及非線性回受，以克服模式誤差、水流干擾、纜線受力等未知力的影響。導航方法採用測距聲納測量港灣結構物外形，經由數據擬合技術產生追蹤參考路徑，以供載具追蹤。本計畫目前正進行海域測試準備、以及側掃聲納界面設計與製作。規劃中之側掃聲納音鼓如圖 4.1 所示。

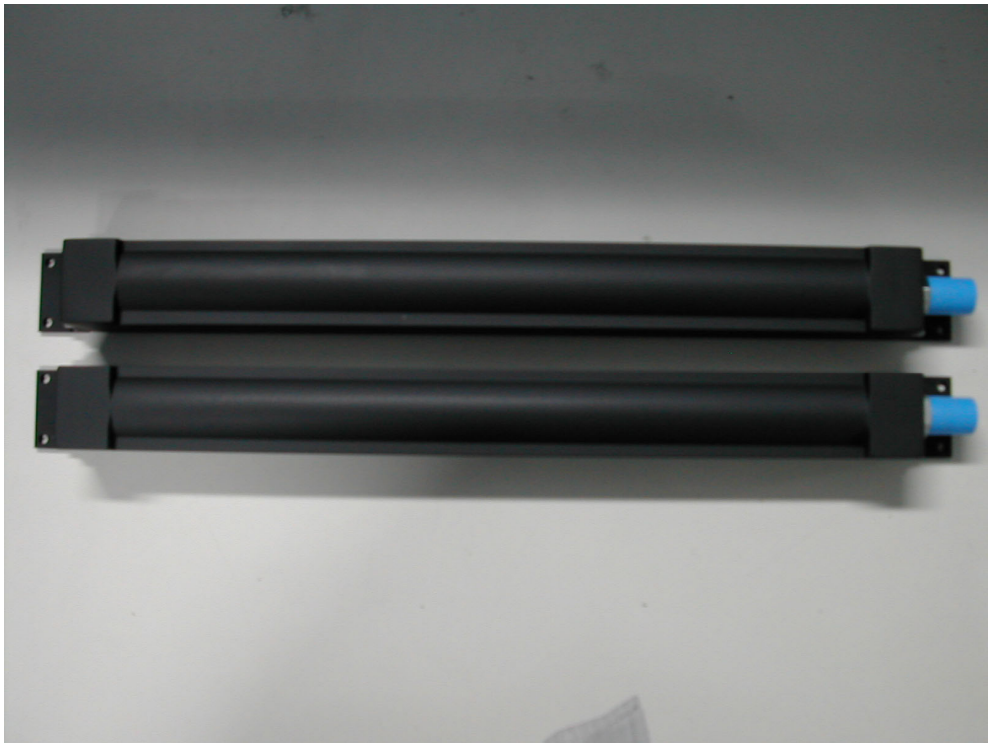


圖 4.1 規劃中之側掃聲納音鼓外形

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.

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。

7. 邱永芳，郭振華，邱逢琛，蔡金吉，「水下結構物自動檢測系統研究(1/4)」，交通部運輸研究所報告，中華民國 94 年 10 月。

8. 邱永芳，郭振華，邱逢琛，蔡金吉，「水下結構物自動檢測系統研究(2/4)」，交通部運輸研究所報告，中華民國 95 年 10 月。

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-96-H2DB009

計畫名稱：**水下結構物自動檢測系統研究**(3/4)

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、完成期中報告，建立載具螺槳推力分配方式，用以控制載具運動。報告中亦提供載具導航感測器之運動量測數據。	一、感謝委員的評論。	一、符合。
二、建議報告中之圖、表各佔乙頁，以清楚圖形(含字體)。	二、期末報告中遵照辦理。	二、依處理情形辦理。
三、文中建議列入本計畫期程之已完成及待完成項，較易了解計畫現況。	三、期末報告將專列已完成及待完成項之說明。	三、依處理情形辦理。
四、參考文獻第一及第七篇重複引用請更正。	四、已更正。	四、依處理情形辦理。
五、報告中對 ROV 系統參數乙章之分析對系統發展有其重要參數依據，此點可受肯定。	五、感謝委員的評論。	五、符合。
六、下一階段之工作，可再多一些介紹。	六、將在期末報告中對下一階段工作詳細說明。	六、依處理情形辦理。
王兆璋 副教授		
一、Model 鑑定與檢測之間的相關係可否加以說明。	一、Model 係數可提供控制器參數之設計參考，此部分將於期末報告中做詳細說明。。	一、依處理情形辦理。

二、P.31 參考文獻[11]，在附錄並沒有。 三、參數鑑定在 Cable 的部分並未包括，但在實際運作時，會有很大的影響，請說明。 四、實驗時，DVL 的準確度，是否足以提供動力參數的鑑定。	二、此處應為[7]，謝謝委員指正。 三、Cable 的影響與操作的環境有關，無法以固定的常數係數來表示。因此在未來控制器設計時將以一個未定但數值有限的變數來表示。此變數的影響可以用控制迴授加以克服。 四、由實驗數據顯示，DVL 的數值，與動力模式所預估之數值十分近似，應足以提供提供動力參數鑑定之用。	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、應盡速做現場試驗，以了解操縱性和穩定性。 二、對資料處理部份應有說明以作為量測儀器採購之依據，及掌握資料精確度。 三、運動的靈敏度和量測需求是否可相符，應考量。	 一、將在期末報告中提供做現場試驗數據。 二、將在期末報告做詳細說明。 三、運動量測器 DVL 及方向儀為目前水下量測儀器通用的設備，其靈敏度為考量經費及可靠性下的最佳選擇。	 一、依處理情形辦理。 二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。
洪憲忠 研究員： 一、建議 P18「Trust」改為「Thrust」。 二、是否已進行模擬運動與實測運動之比較？	 一、已更正，謝謝委員指正。 二、已在水槽中進行模擬與實測運動之對照比較，未來將在海水中進行比較。	 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-96-H2DB009**

計畫名稱：**水下結構物自動檢測系統研究**(3/4)

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
陳陽益　教授		
1. 如何將波浪(尤其不規則波)與浪、潮汐等自然因素所造成載具的位移消去掉。	1. 載具運用導航感測器量測位置，並使用自動控制方法，消除波浪、潮汐等自然因素所造成載具的位移。	1. 依處理情形辦理。
2. 可否將儀器本身與外在自然因素如1點所述的精確度分開來算，並列出，以便日後方便評估與造成誤差的主因的判定。	2. 因使用動態定位，1 點所述之誤差可自動被補償，因此定位誤差僅與儀器誤差有關。	2. 依處理情形辦理。
3. 可否請列述本儀器可量測的是什麼及其精確度如何？即隨深度與自然因素及儀器本身的運動量下其精確度如何？	3. 導航聲納採用都卜勒速度聲納，使用深度為1-200m，海底追蹤精確度為 0.3cm/s (V=1.0 m/s)，準確度為±0.4%。	3. 依處理情形辦理。
4. 本計畫執行成果很不錯，最好期末簡報中的成果照片圖併入期末報告中。	4. 期末簡報中的成果照片圖已併入期末報告中。	4. 依處理情形辦理。
張順雄 教授		
1. 本年度主要成果為 (1) 水下載具系統整合與水槽測試。 (2) 載具追隨港灣結構物外型之導航控制架構。	1. 感謝委員的評論。	1. 符合。
2. 報告 P5.施行港灣防波堤的	2. 期末簡報中的測試結果已	2. 依處理情形辦理。

水下表面觀測作業測試，於內文尚未呈現。	併入期末報告中。	
3. 摘要與英文摘要並不一致，應將結語部分互為融合較為恰當。	3. 已更正。	3. 依處理情形辦理。
4. 參考文獻宜加入過去兩年所完成成果之文獻，建議此為第三年之成果，宜在結語處列出各年成果。	4. 已遵照辦理。	4. 依處理情形辦理。
5. P13.AUV 之架構所列之臍帶電腦與未來獨立作業之 AUV 關聯性及作業正確性宜有討論。	5. 本計畫所發展之遙控潛艇之主要功能為施行港灣結構物之表面觀測，所有功能皆可直接轉移至未來獨立作業之 AUV。	5. 依處理情形辦理。
6. 文字誤繕請校正。	6. 已修改。	6. 符合。
7. 螺槳的測試數據宜列入報告。	7. 已將螺槳的測試數據列入報告。	7. 依處理情形辦理。
李賢華　教授		
1. 本計畫從基本載具導航運動控制數學模式，開始較偏向基礎研究，尤其以前 2 年研究成果而言。	1. 感謝委員的評論。載具導航運動控制數學模式為載具運動控制之基礎，其參數因個別載具而不同，需要做相關之研究。	1. 依處理情形辦理。
2. 本年度計畫成果報告較為簡略，主要為載具系統設計及導航與控制器設計兩大部分，多偏向理論說明。	2. 本計畫所發展之載具系統已開始做測試。期末報告修正稿已加入測試數據。	2. 依處理情形辦理。
3. 本案以水下結構自動檢測為目標，且擬以測距聲納為儀器，恐不易達成水下複雜結構系統之檢測。	3. 測距聲納做為載具量測結構物表面位置之感測器，以做為載具位置控制之根據。觀察記錄之主要儀器為水下攝影機，而目前潛水人員所使用之觀察儀器亦為攝影機。	3. 依處理情形辦理。
邱永芳　主任		
1. 電力供應問題，應考量自行供給方式方為可行，請考量。	1. 電力供應擬採用汽油發電機，正進行採購與測試。	1. 依處理情形辦理。
2. 本計畫之社會與經濟效益應進一步說明。即自行開發之技術說明其未來可能應用與發展方向。	2. 本計畫自行開發的水下載具追蹤港灣結構物表面，以進行影像紀錄檢測的方法為世界各國競相發展中	2. 依處理情形辦理。

3. 水深測試應考量。	的技術。除了結構物表面觀測外，也可用來觀測船舶底部、海床等，未來配合側掃聲納與多音束聲納，亦可做海難搜尋等有利於民生之用途。 3. 即期內將做水深測試。	3. 依處理情形辦理。
蔡立宏　研究員 1. 目前載具的量測資料以影像座標為主，是否能再搭載其他儀器量測其他參數。 2. 載具的操作在近岸結構物附近，其他位置受水流、波浪影響大，建議日後須提出載具操作的適用性、限制性條件。 3. 水下拍攝成果均為局部小面積，未來研究建議將小照片合成大照片以展現成果。	 1. 本計畫正進行高頻側掃聲納儀器之規劃製作，為來可以量測港灣結構物外觀之側掃聲納影像。 2. 未來將提出載具操作的適用性、限制性條件。 3. 謝謝委員建議。本計畫正在進行合成影像之研究。	 1. 依處理情形辦理。 2. 依處理情形辦理。 3. 依處理情形辦理。

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(3/4)
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

1

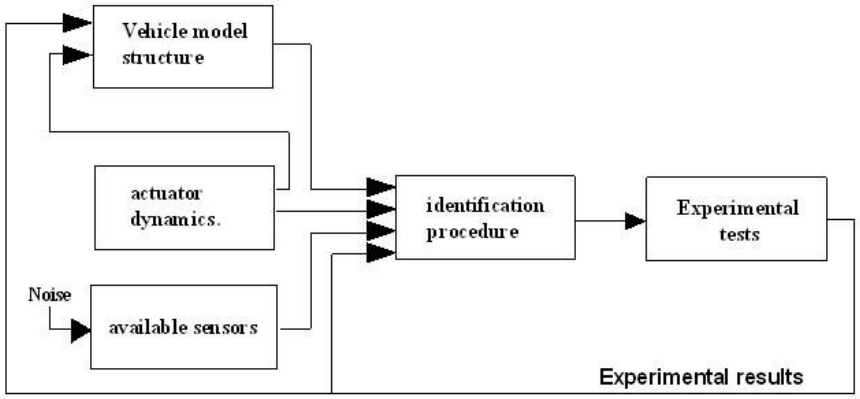
Contents

- 1.Introduction
- 2.Remotely Operated Vehicle
- 3.Thruster Model Experimental Results
- 4.Parameter Identification Experimental Results
- 5.Conclusions

2

Introduction

Identification Procedure



3

Remotely Operated Vehicle

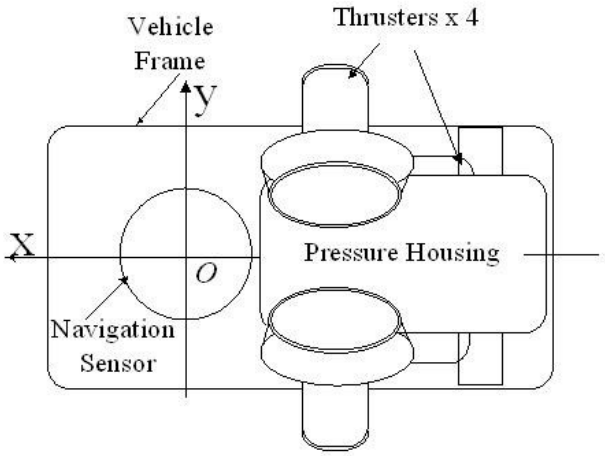
4

ROV **Specifications**

Parameter	Specifications
Dimensions	1000mm(L) 700mm(W) 550mm(H)
Weight	80kg (in air)
Cable length	130 m
Max speed	Max 0.8 m/s
Propellers	4x1 hp
Navigation	Doppler Sonar(1200kHz)
Power	220VAC, 50/60 Hz, 10 Amps

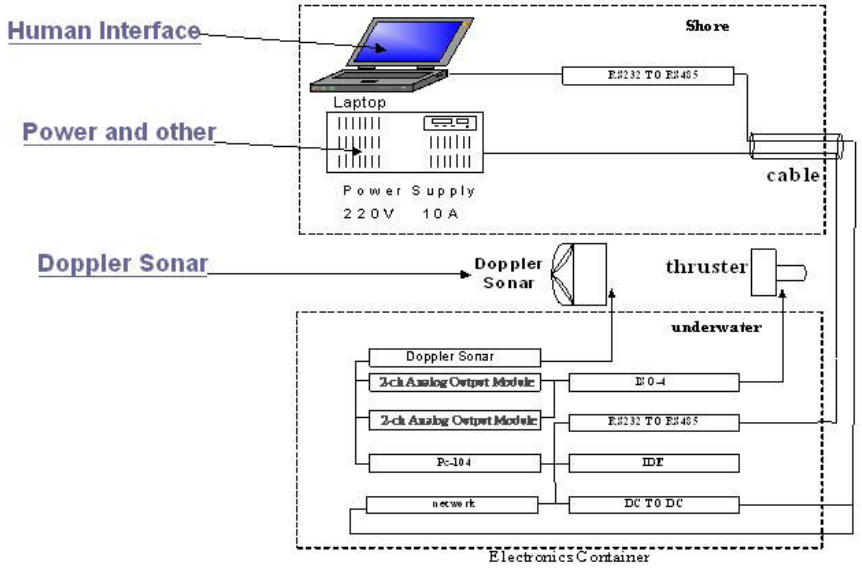
5

Arrangement of the ROV



6

Hardware Arrangement



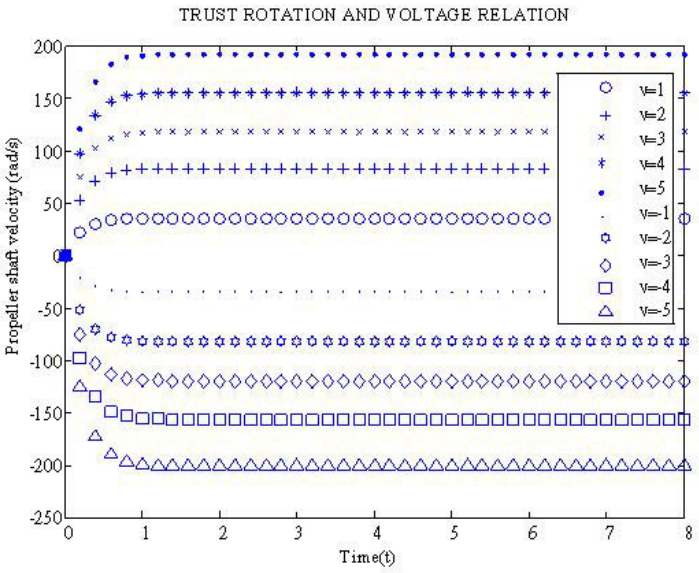
7

Motor model

$$\dot{\Omega} = k_t \left(V_{in} - \frac{k_{f_0}}{k_t} \mathrm{sgn}(\Omega) \right) - k_{f_1} \Omega$$

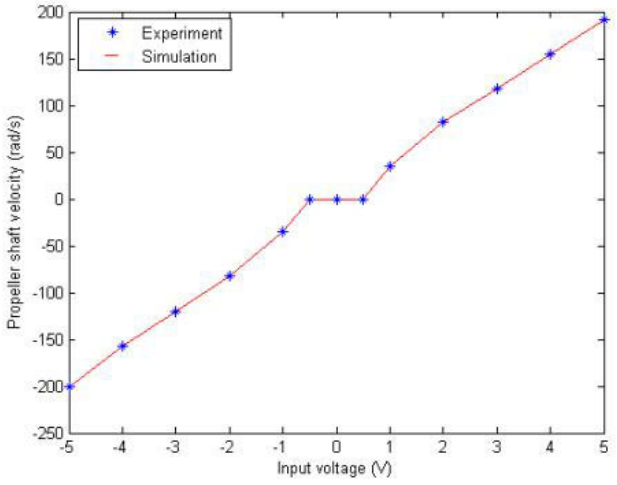
k_t, k_{f_0}	is the shaft torque coefficient
$\dot{\Omega}$	is propeller shaft acceleration
Ω	is propeller shaft velocity
V_{in}	is input voltage

8



9

Velocity map of propeller shaft



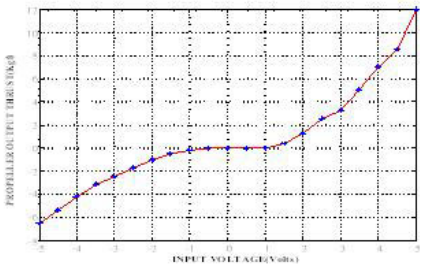
10

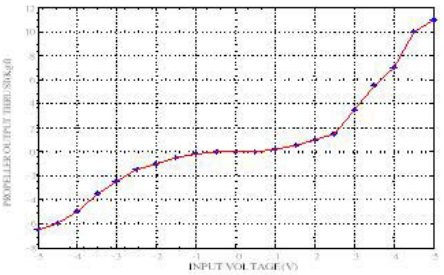
$$T = 2\rho A_p(k_1 u + k_2 D\Omega)(k_1 u + k_2 D\Omega - u)$$
$$= 2\rho A_p(k_1' u^2 + k_2' uD\Omega + k_3' D^2\Omega^2)$$

k_1', k_2', k_3'	are constant
T	is the propeller thrust
A_p	is the propeller disk area
u	is the vehicle velocity
D	is the propeller disk diameter
Ω	is propeller shaft velocity

11

Propeller thrust curve: Simulation and Experiment





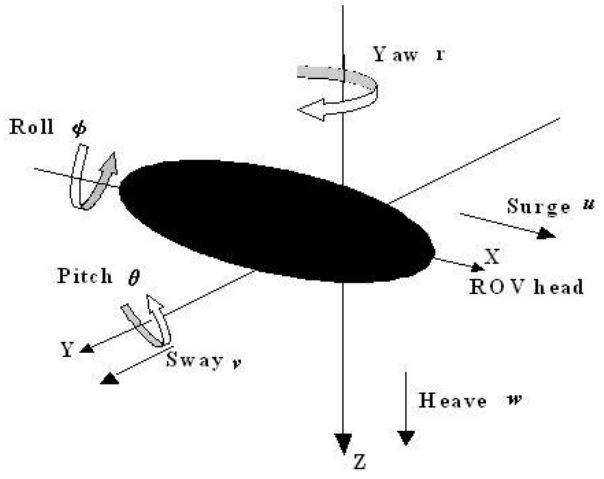
12

The distribution of thrust in every motional direction

motional direction	thrust setup	F_1	F_2	F_3	F_4
surge	$F_x = \theta$; $F_y = M_z = F_z = \theta$	0	0	$\frac{-L4}{L3+L4} F_x$	$\frac{-L4}{L3+L4} F_x$
sway	$F_y = \theta$; $F_x = M_z = F_z = \theta$	$\frac{-0.5}{\cos(\alpha)} F_y$	$\frac{0.5}{\cos(\alpha)} F_y$	0	0
yaw	$M_z = \theta$; $F_x = F_y = F_z = \theta$	0	0	$\frac{1}{L3+L4} M_z$	$\frac{-1}{L3+L4} M_z$
heave	$F_z = \theta$; $F_x = F_y = M_z = \theta$	$\frac{-0.5}{\sin(\alpha)} F_z$	$\frac{-0.5}{\sin(\alpha)} F_z$	0	0

13

Coordinate systems



14

Vehicle modeling

$$m_{\xi}\dot{\xi} = -b_{\xi}\xi - c_{\xi|\xi|}\xi|\xi| + \bar{F}\eta + n_{\xi}$$

$$m_u\dot{u} = -b_u u - c_{u|u|}u|u| + F_x\eta_x + n_u$$

$$m_v\dot{v} = -b_v v - c_{v|v|}v|v| + F_y\eta_y + n_v$$

$$I_z\dot{r} = -b_r r - c_{r|r|}r|r| + M_z\eta_z + n_r$$

$$m_w\dot{w} = -b_w w - c_{w|w|}w|w| + F_z\eta_z + n_w$$

15

Identification of the drag

Under steady-state conditions

$$0 = -b_{\xi}\xi - c_{\xi|\xi|}\xi|\xi| + \bar{F}\eta + n_{\xi}$$

when the applied force and torque is constant

16

$$y = [F^*_{\xi_1}, \ldots\ldots, F^*_{\xi_{n^*}}, F_1\big|_{\mu=1}, \ldots\ldots, F_n\big|_{\mu=1}, F_1\big|_{\mu=1}, \ldots\ldots, F_n\big|_{\mu=M},]^T, \quad y \in R^{n^*+\sum_{\mu=1}^{M} n(\mu),1}$$

$$H = \begin{bmatrix} \xi_1 & \xi_1|\xi_1| \\ \vdots & \vdots \\ \xi_{n^*} & \xi_{n^*}|\xi_{n^*}| \\ \xi_1\big|_{\mu=1} & \xi_1|\xi_1|\big|_{\mu=1} \\ \vdots & \vdots \\ \xi_1\big|_{\mu=M} & \xi_{n(\mu)}|\xi_{n(\mu)}|\big|_{\mu=1} \\ \vdots & \vdots \\ \xi_1\big|_{\mu=M} & \xi_1|\xi_1|\big|_{\mu=M} \\ \vdots & \vdots \\ \xi_{n(\mu)}\big|_{\mu=M} & \xi_{n(\mu)}|\xi_{n(\mu)}|\big|_{\mu=M} \end{bmatrix}, \quad H \in R^{n^*+\sum_{\mu=1}^{M} n(\mu),2} \qquad \theta = \left[b_\xi, c_{\xi|\xi|} \right]^T, \theta \in R^{2,1}$$

17

Identification of the inertia coefficients

$$m_{\dot{\xi}} \dot{\xi}_0 = -k_L \xi_0$$

$$k_L = b_\xi + 2c_{\xi|\xi|}$$

$$t_c = m_{\dot{\xi}} / k_L$$

18

Optimal input design

$$\dot{S} = \frac{d}{dt}\frac{\partial \xi}{\partial \theta} = \frac{\partial \dot{\xi}}{\partial \xi}\frac{\partial \xi}{\partial \theta} + \frac{\partial \dot{\xi}}{\partial \theta} = JS + G$$

$$S(i) = \frac{\partial \xi(i)}{\partial \theta}\Big|_{\theta=\hat{\theta}} \qquad J = \frac{\partial \dot{\xi}}{\partial \xi} \quad \text{and} \quad G = \frac{\partial \dot{\xi}}{\partial \theta}$$

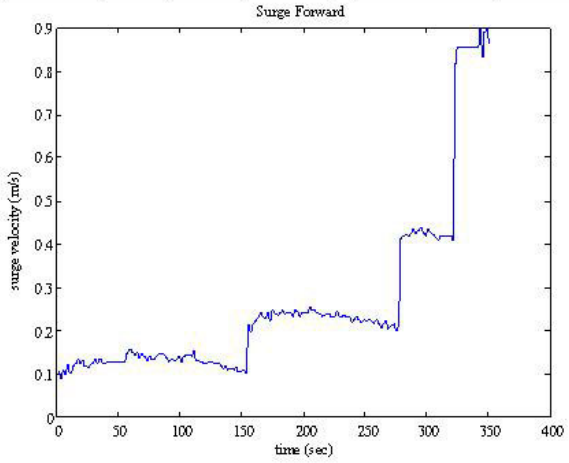
$$M = \sum_{i=1}^{N} S(i)^T R^{-1} S(i) \qquad C(\theta) = tr(M^{-1})$$

19

Surge forward model identification

Inputs(volts)	0.7	1	1.5	3
Forces(kg)	0.16	0.4	1.0	7.0

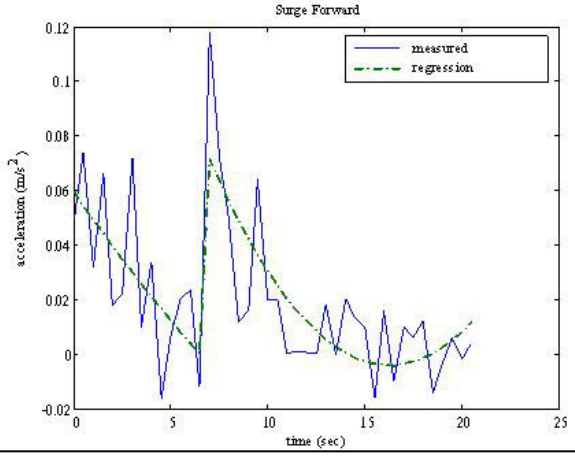
$m_u\left(kg, \frac{s^2}{m}\right)$	$b_u\left(kg, \frac{s}{m}\right)$	$c_{u\|u\|}\left(kg, \frac{s^2}{m^2}\right)$
8.9880	0.0052	3.3409



20

Optimum Inputs for the second trial

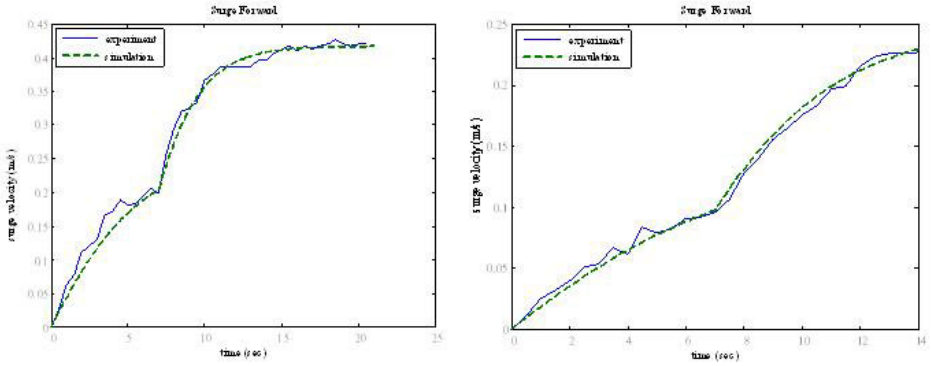
Inputs(*volts*)	1.0	1.5	1.5
Forces(*kg*/)	0.4	1.0	1.0



21

Results of surge forward motion system identification

$m_u(kg/\frac{s^2}{m})$	$b_u(kg/\frac{s}{m})$	$c_{u\|u\|}(kg/\frac{s^2}{m^2})$	η_u (kg/)	η_x
8.9880	0.4344	4.6965	-0.0135	0.8814

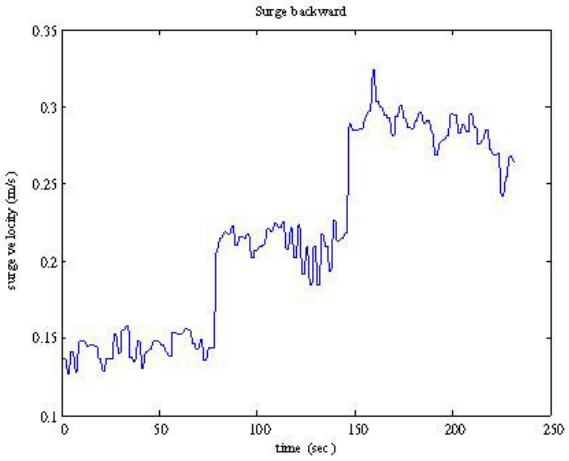


22

Surge backward model identification

Inputs(*volts*)	0.8	1	1.5
Forces(kg_f)	0.24	0.4	1.0

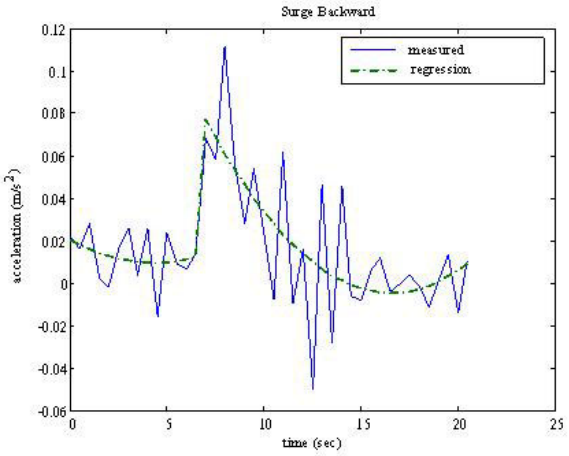
$m_u\left(kg_f\frac{s^2}{m}\right)$	$b_u\left(kg_f\frac{s}{m}\right)$	$c_{u\|u\|}\left(kg_f\frac{s^2}{m^2}\right)$
8.4211	0.9087	9.2311



23

Optimum Inputs for the second trial

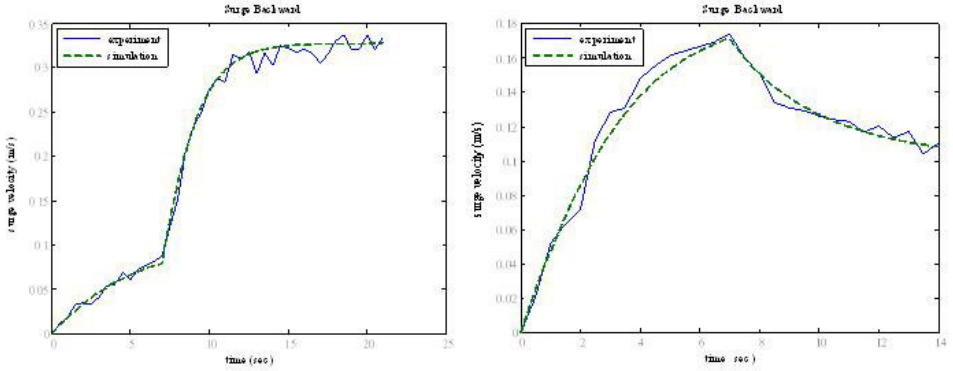
Inputs(*volts*)	0.7	1.5	1.5
Forces(kg_f)	0.4	1.0	1.0



24

Results of surge backward motion system identification

$m_u (kg, \frac{s^2}{m})$	b_u $(kg, \frac{s}{m})$	$c_{u\|u\|}$ $(kg, \frac{s^2}{m^2})$	η_u (kg)	η_x
8.4211	0.9732	6.3466	-0.0064	0.8071

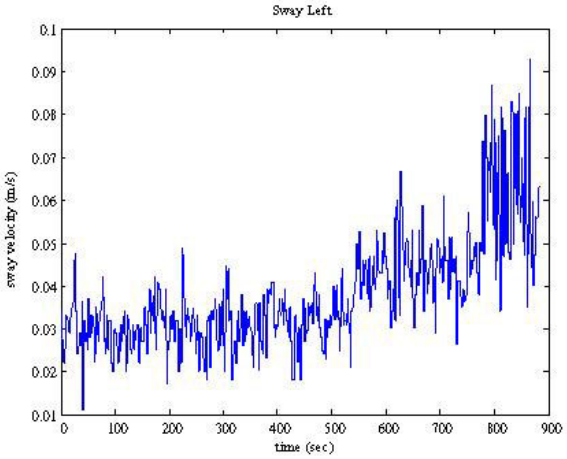


25

Sway left model identification

Inputs(*volts*)	0.8	1	1.5
Forces(kg)	0.06	0.1	0.25

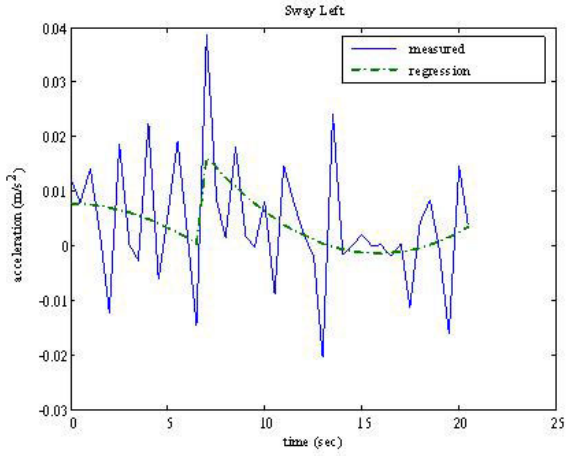
m_v $(kg, \frac{s^2}{m})$	b_v $(kg, \frac{s}{m})$	$c_{v\|v\|}$ $(kg, \frac{s^2}{m})$
10.5	1.7475	14.8775



26

Optimum Inputs for the second trial

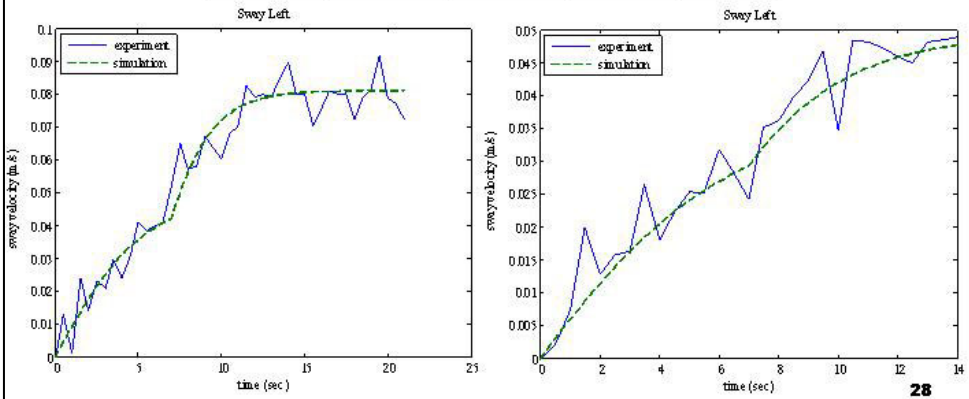
Inputs(*volts*)	1.0	1.5	1.5
Forces(*kg*)	0.1	0.25	0.25



27

Results of sway left motion system identification

$m_v\left(kg\,\frac{s^2}{m}\right)$	$b_v\left(kg\,\frac{s}{m}\right)$	$c_{v\|v\|}\left(kg\,\frac{s^2}{m^2}\right)$	$n_v\ (kg)$	η_v
10.5	0.3664	33.4245	-0.0013	0.6726

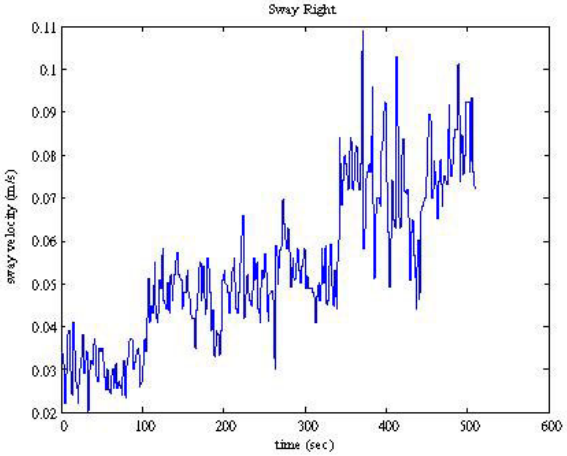


28

Sway right model identification

Inputs(*volts*)	0.8	1	1.5
Forces(kg_f)	0.06	0.1	0.25

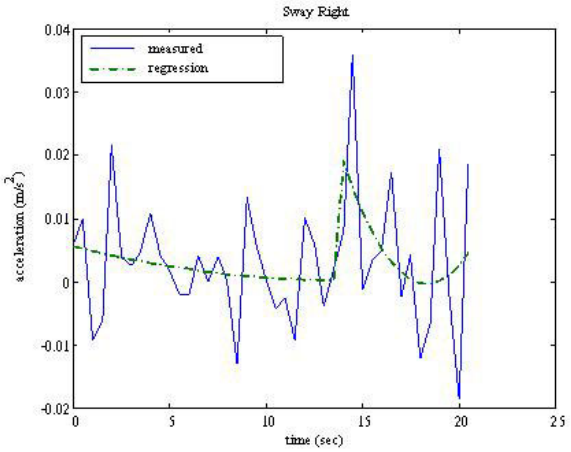
$m_v\ (kg_f \frac{s^2}{m})$	$b_v\ (kg_f \frac{s}{m})$	$c_{v\|v\|}\ (kg_f \frac{s^2}{m^2})$
9.5238	1.4750	23.2095



29

Optimum Inputs for the second trial

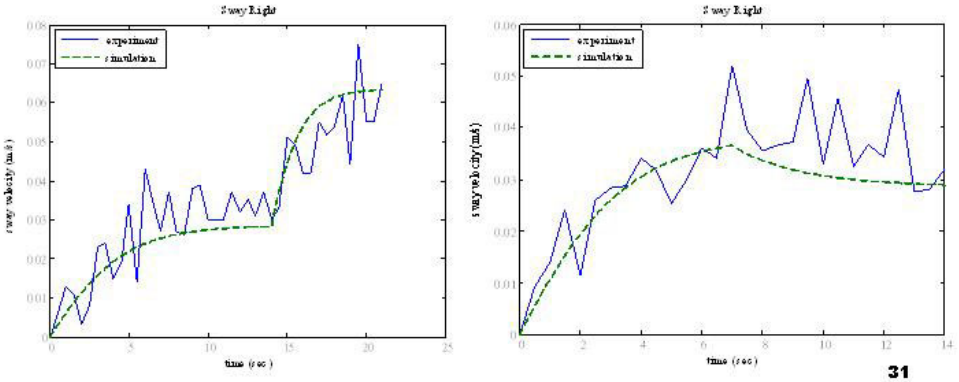
Inputs(*volts*)	0.8	0.8	1.5
Forces(kg_f)	0.06	0.06	0.25



30

Results of sway right motion system identification

$m_v\left(kg_f \frac{s^2}{m}\right)$	$b_v\ \left(kg_f \frac{s}{m}\right)$	$c_{v\|v\|}\ \left(kg_f \frac{s^2}{m^2}\right)$	$n_v\ \ (kg_f)$	η_v
9.5238	0.6070	52.4541	-0.0018	0.6947

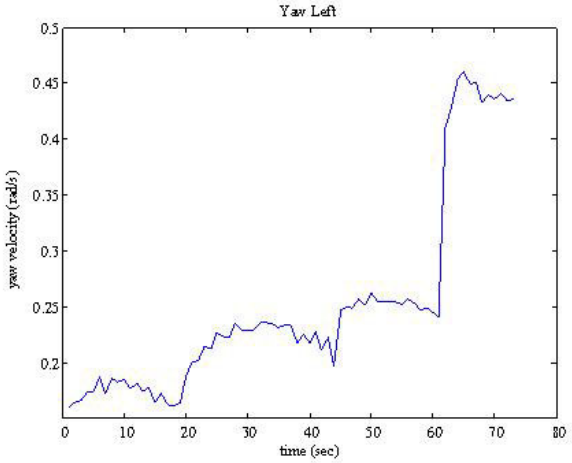


31

Yaw left model identification

Inputs(*volts*)	0.8	0.9	1	1.5
Forces($kg_f \cdot m$)	0.044	0.059	0.074	0.185

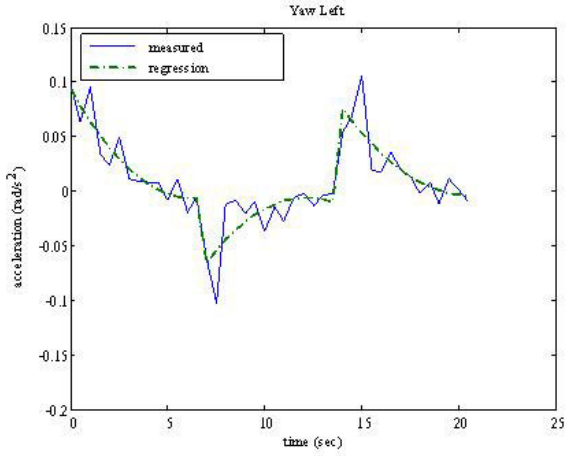
$I_r\ \left(kg_f \cdot m \cdot s^2\right)$	$b_r\left(kg_f \cdot m \cdot s\right)$	$c_{r\|r\|}\ \left(kg_f \cdot m \cdot s^2\right)$
0.6141	0.1327	0.6473



32

Optimum Inputs for the second trial

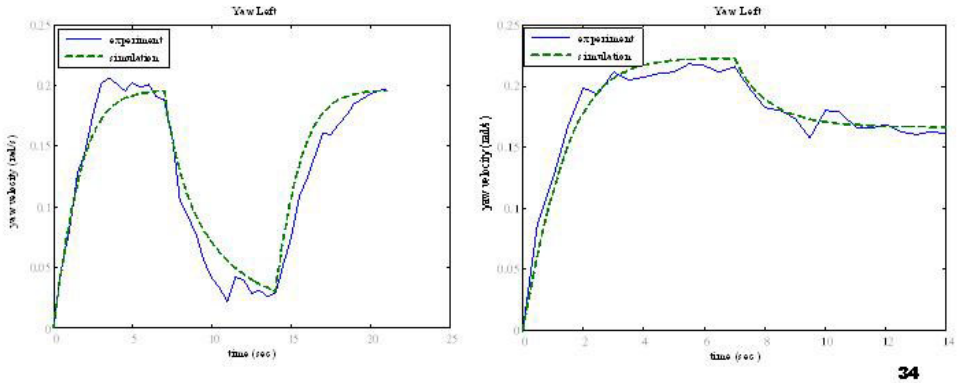
Inputs(*volts*)	0.9	0	0.9
Forces($kg_f \cdot m$)	0.0592	0	0.0592



33

Results of yaw left motion system identification

$I_r (kgf \cdot m \cdot s^2)$	b_r $(kgf \cdot m \cdot s)$	$C_{r\|r\|}$ $(kgf \cdot m \cdot s^2)$	n_r (kg_f)	η_z
0.6141	0.0776	1.1375	-0.0067	0.8212

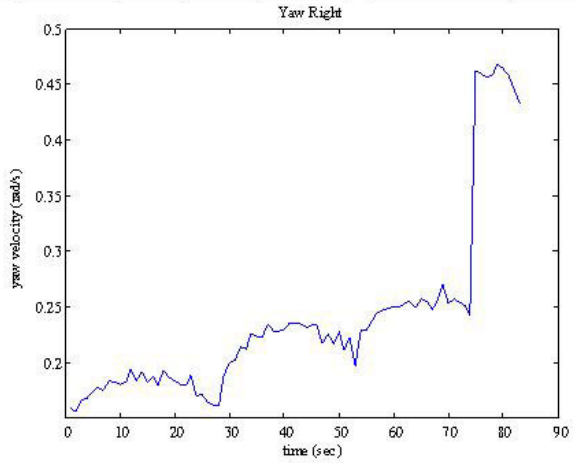


34

Yaw right model identification

Inputs(volts)	0.8	0.9	1	1.5
Forces($kg_f \cdot m$)	0.044	0.059	0.074	0.185

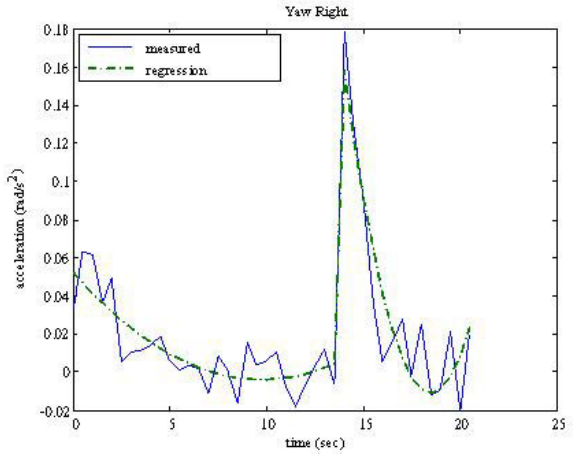
$I_z\ (kg_f \cdot m \cdot s^2)$	$b_r\ (kg_f \cdot m \cdot s)$	$C_{r\|r\|}\ (kg_f \cdot m \cdot s^2)$
0.6831	0.1534	0.5471



35

Optimum Inputs for the second trial

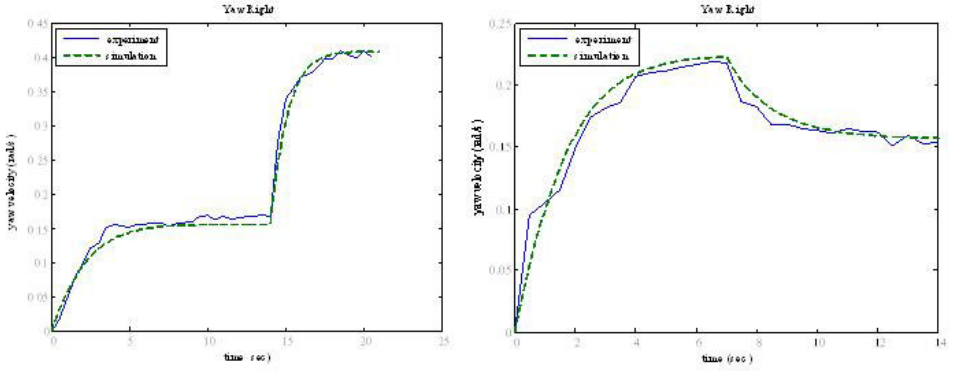
Inputs(volts)	0.8	0.8	1.5
Forces($kg_f \cdot m$)	0.0444	0.0444	0.1850



36

Results of yaw right motion system identification

$I_z\left(kgf\cdot m\cdot s^2\right)$	$b_r\ \left(kgf\cdot m\cdot s\right)$	$C_{r\|r\|}\ \left(kgf\cdot m\cdot s^2\right)$	$n_r\ \left(kg_f\right)$	η_z
0.6831	0.1801	0.6646	-0.00117	0.8784

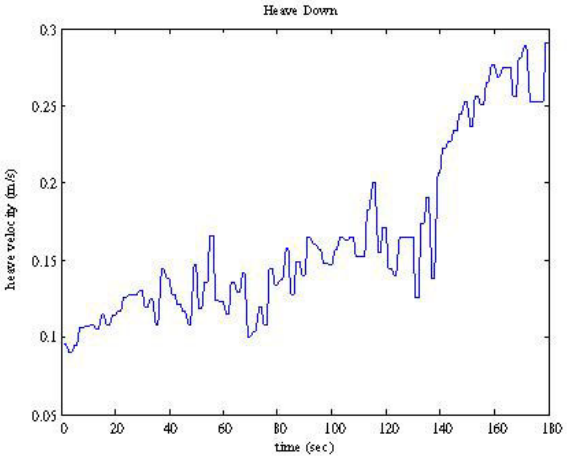


37

Heave down model identification

Inputs(*volts*)	0.8	1	1.5
Forces(kg_f)	0.2	0.3464	0.866

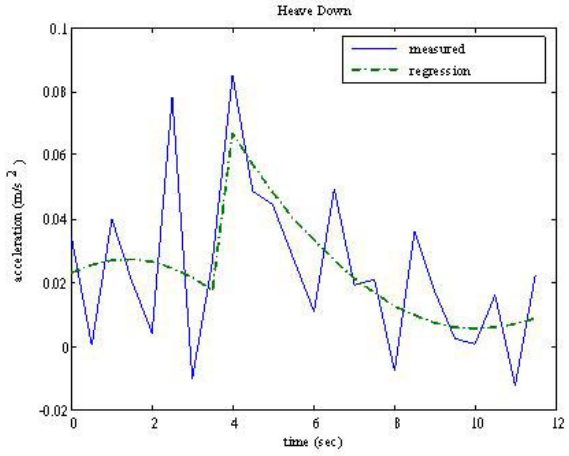
$m_w\left(kg_f\frac{s^2}{m}\right)$	$b_w\left(kg_f\frac{s}{m}\right)$	$c_{w\|w\|}\left(kg_f\frac{s^2}{m^2}\right)$
11.3923	0.7405	9.6029



38

Optimum Inputs for the second trial

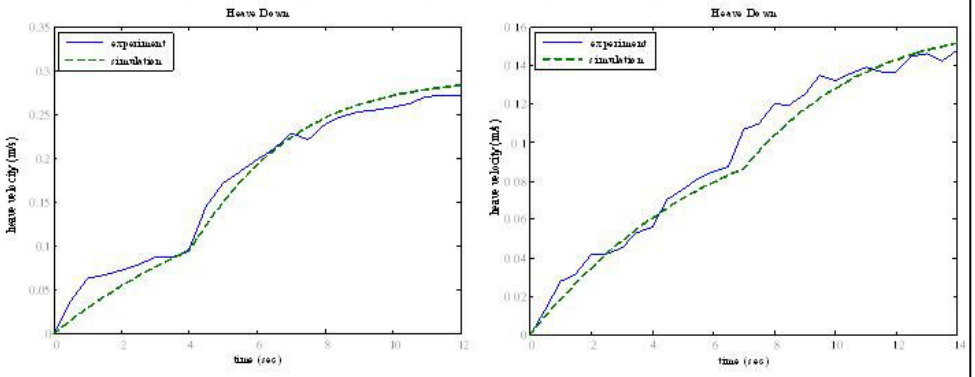
Inputs(*volts*)	1.0	1.5	1.5
Forces(*kg*)	0.3464	0.8660	0.8660



39

Results of heave down motion system identification

$m_w(kg, \frac{s^2}{m})$	b_w ($kg, \frac{s}{m}$)	$c_{w\|w\|}$ $(kg, \frac{s^2}{m^2})$	n_w $(kg,)$	η_z
11.3923	1.0755	6.4721	-0.0035	0.7345

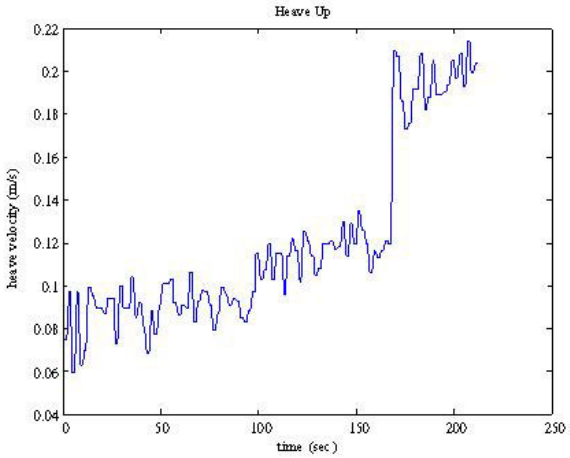


40

Heave up model identification

Inputs(*volts*)	0.8	1	1.5
Forces(kg_f)	0.2	0.3464	0.866

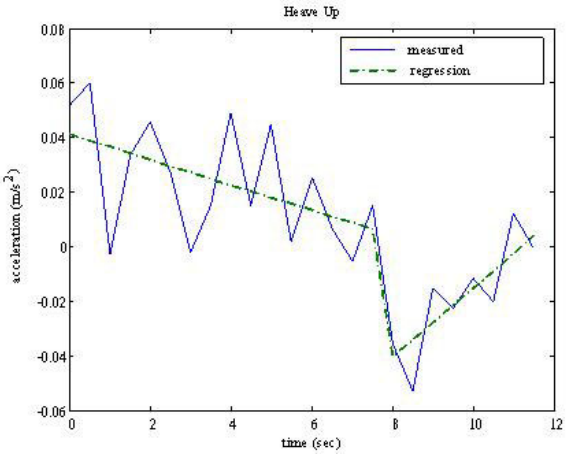
$m_w\left(kg_f\frac{s^2}{m}\right)$	$b_w\left(kg_f\frac{s}{m}\right)$	$c_{w\|w\|}\left(kg_f\frac{s^2}{m^2}\right)$
10.8461	3.9461	7.1044



41

Optimum Inputs for the second trial

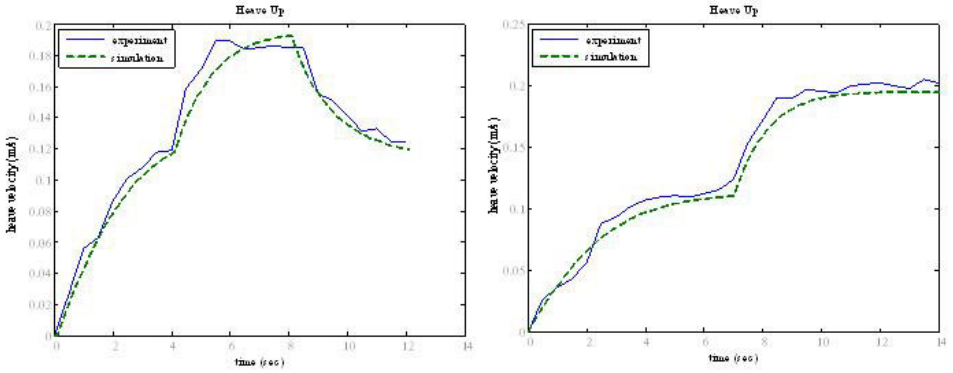
Inputs(*volts*)	1	1.5	0.8
Forces(kg_f)	0.3464	0.8660	0.2078



42

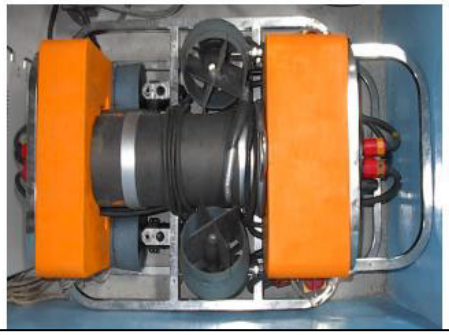
Results of heave up motion system identification

$m_w(kg/\frac{s^2}{m})$	$b_w\ (kg/\frac{s}{m})$	$c_{w\|w\|}\ (kg/\frac{s^2}{m^2})$	$n_w\ (kg/\ )$	η_z
10.8461	1.0908	22.3969	-0.0051	0.7786



43

ROV



44

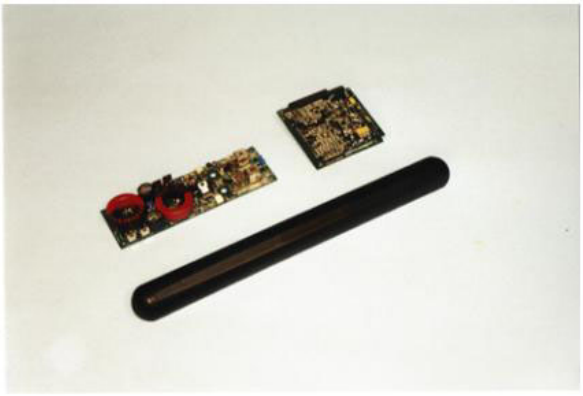
Cable

45

Range Sensor

46

Side Scan Sonar



47

Video Camera & Lights

48

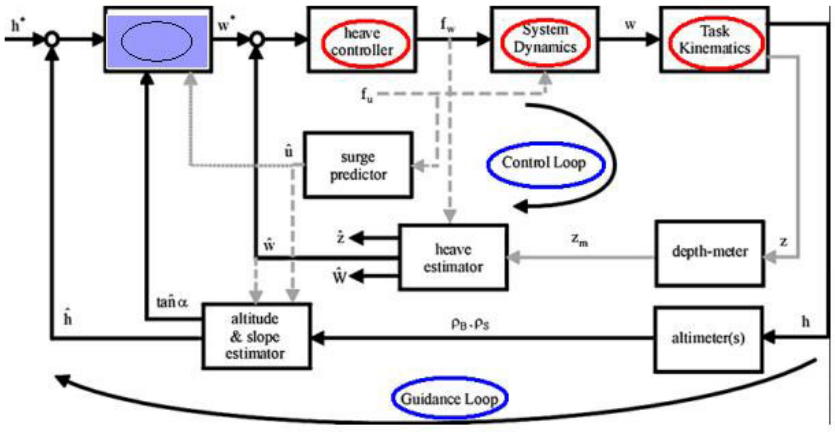
Summary

- 1. Successful implementation of a least squares technique on a remotely operated vehicle confirms the applicability of the system identification process.

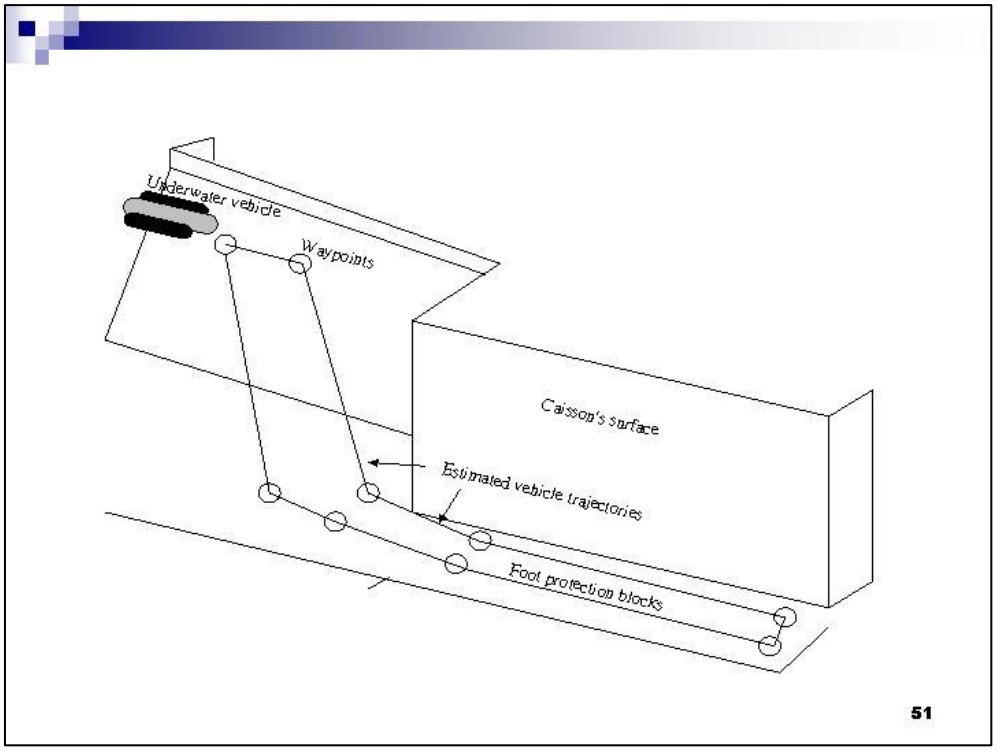
- 2. The identified values of thruster deduction coefficients, linear drag coefficient, quadratic drag coefficient, inertia parameters and disturbance coefficient are in their reasonable ranges. This indicates that the surge, sway, yaw and heave model accurately reflects the dynamics of a remotely operated vehicle.

49

Future Works



50


Underwater vehicle
Waypoints
Caisson's surface
Estimated vehicle trajectories
Foot protection blocks
51

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(3/4)
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

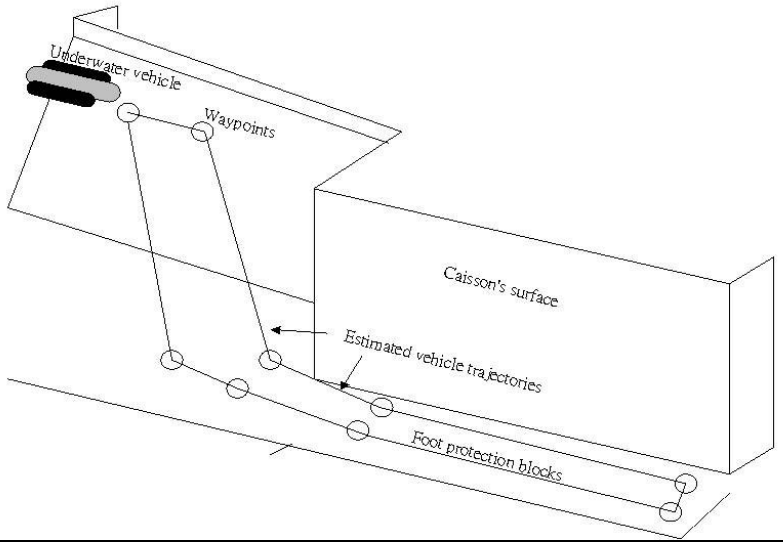
- 1. 計畫簡介
- 2. 水下載具
- 3. 導航與控制器
- 4. 測試數據
- 5. 結語及未來規劃

研究內容規劃

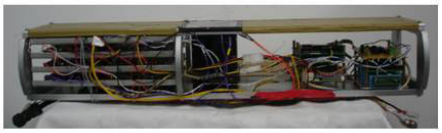
水下載具系統整合與測試：

1. 包含電纜及酬載儀器在內的系統設計、軟硬體整合與水槽測試、發展港灣水下結構物觀測作業系統所需之軟硬體整合介面、與測掃聲納及多聲束聲納整合之介面設計。
2. 在水槽內測試子系統及儀具的功能，在水槽內確認整體系統的功能正常。港灣水下表面觀測作業準備。

水下結構物表面觀測

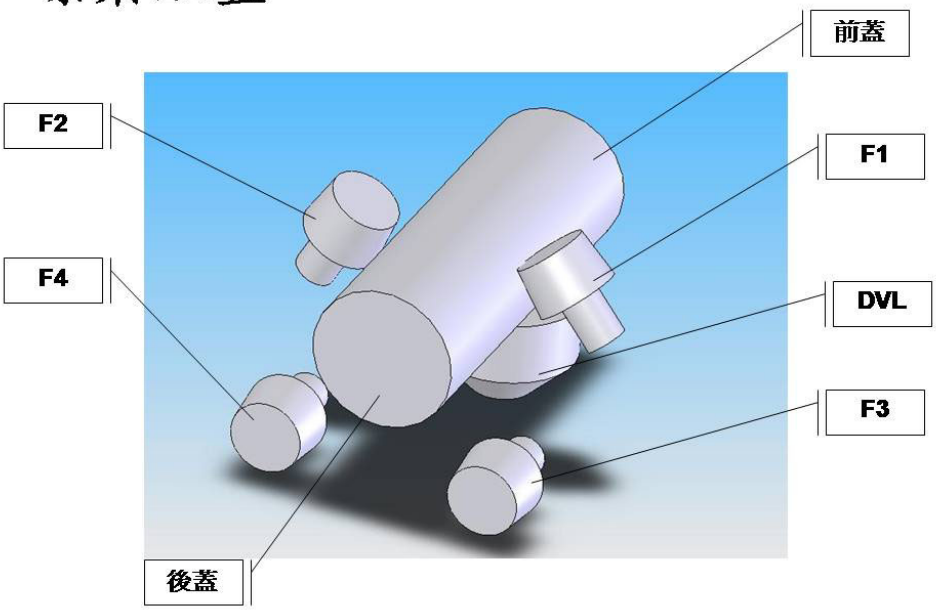


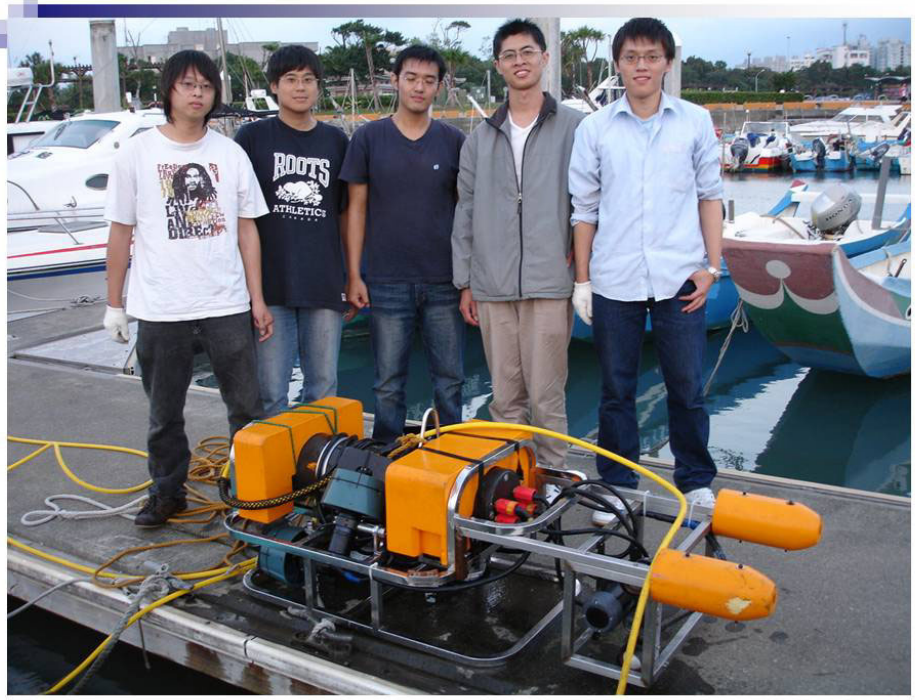
水下載具系統



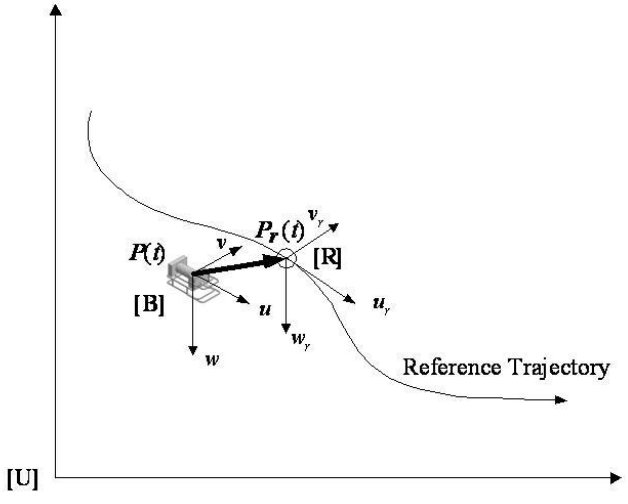
載具大小:
1060mm (L)x 700mm (W)x 550mm (H)
重　　量 : *85kg (in air)*
潛航深度: *100 m*
纜線長度: *120m*
最大速度: *Max 0.8 m /s*
運算能力: *Pentium III 900 MHz*
推進動力: *4 x 1 hp*
感測元件: *Doppler Sonar(1200kHz),Side Scan Sonar, Camera*
電力需求: *220VAC, 50/60 Hz, 10 Amps*

螺槳配置

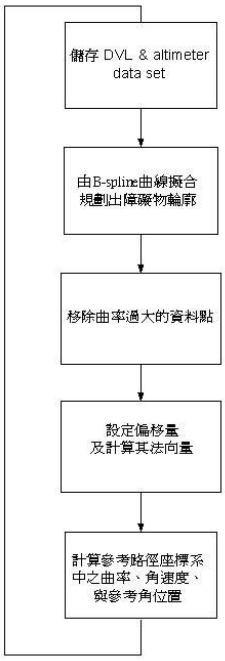



ROOTS
ATHLETICS

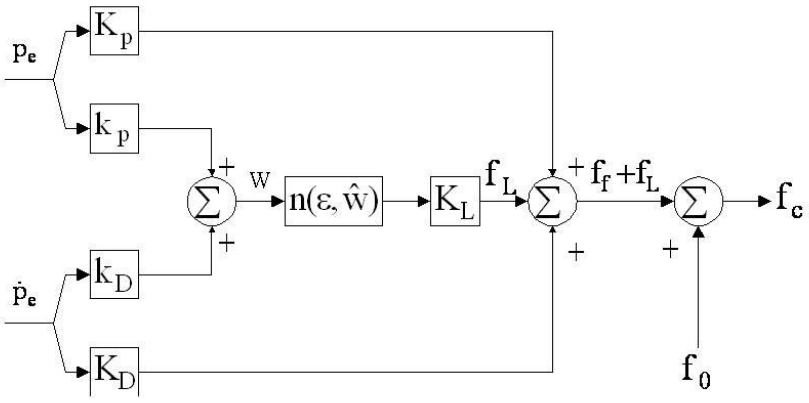
導航


$P_r(t)$
v_r
$P(t)$
v
[R]
[B]
u
u_r
w_r
w
Reference Trajectory
[U]

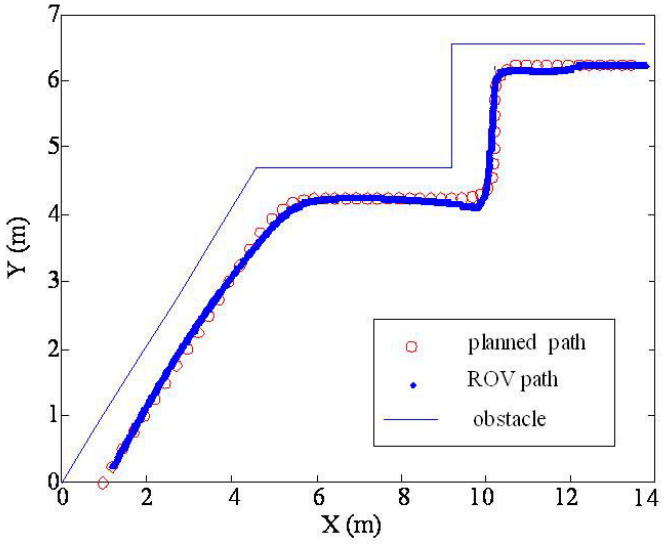
路徑規劃


儲存 DVL & altimeter data set
由B-spline曲線擬合規劃出障礙物輪廓
移除曲率過大的資料點
設定偏移量及計算其法向量
計算參考路徑座標系中之曲率、角速度、與參考角位置

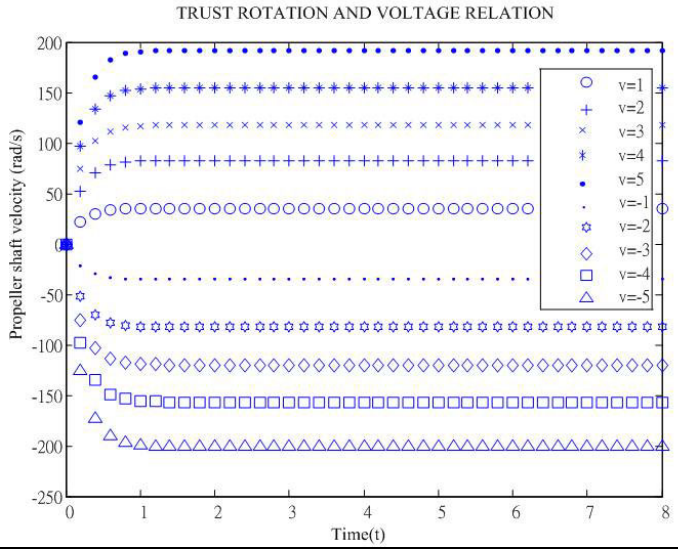
控制


p_e
$\dot{p}_e$
K_p
k_p
k_D
K_D
W
$n(\varepsilon, \hat{w})$
K_L
f_L
$f_f + f_L$
f_c
f_0

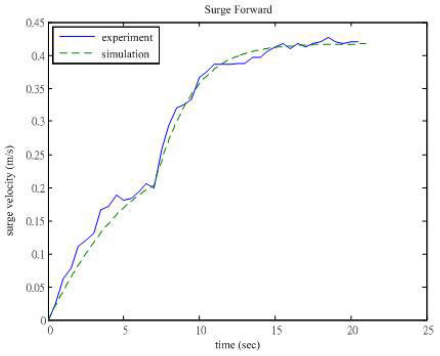
導航及控制器模擬

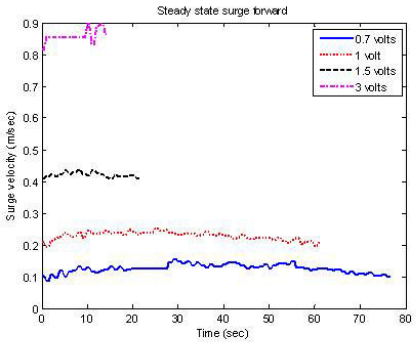


測試數據—螺槳



系統參數鑑定—運動量測





系統參數鑑定—阻尼係數

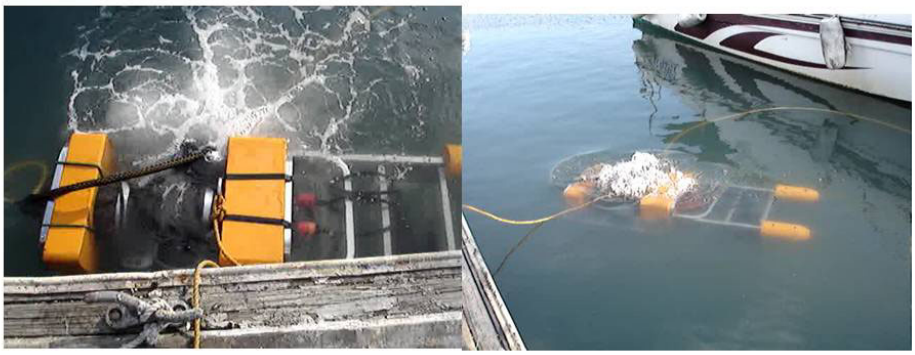
	Positive direction		Negative direction	
	Linear	Quadratic	Linear	Quadratic
Surge	4.26	46.07	9.55	62.26
Sway	5.95	514.57	3.59	327.89
Heave	10.55	63.49	10.70	219.71
Yaw	1.76	6.51	0.76	11.15

系統參數鑑定—質量係數

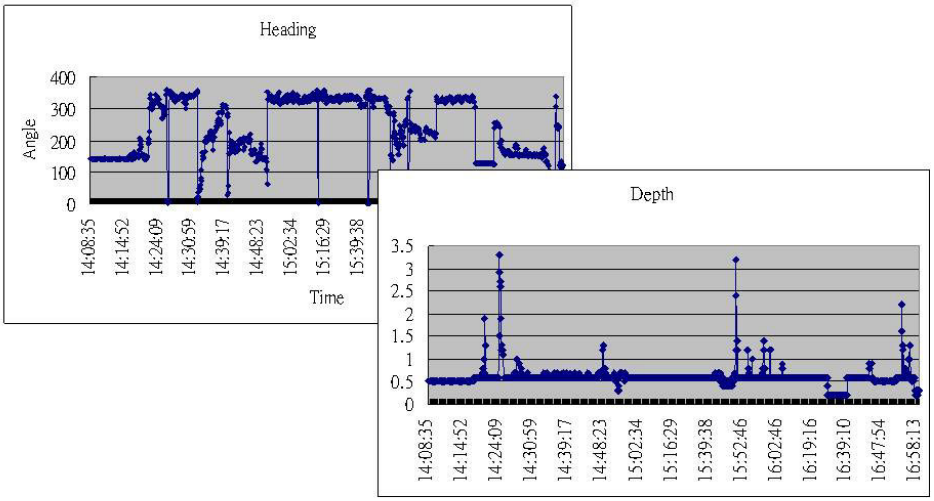
	Surge (Kg)	Sway (Kg)	Heave (kg)	Yaw (Kg m^2)
Positive Direction	88.71	93.42	111.75	6.70
Negative Direction	82.61	103.00	106.40	6.02

水槽測試

碼頭水下觀測

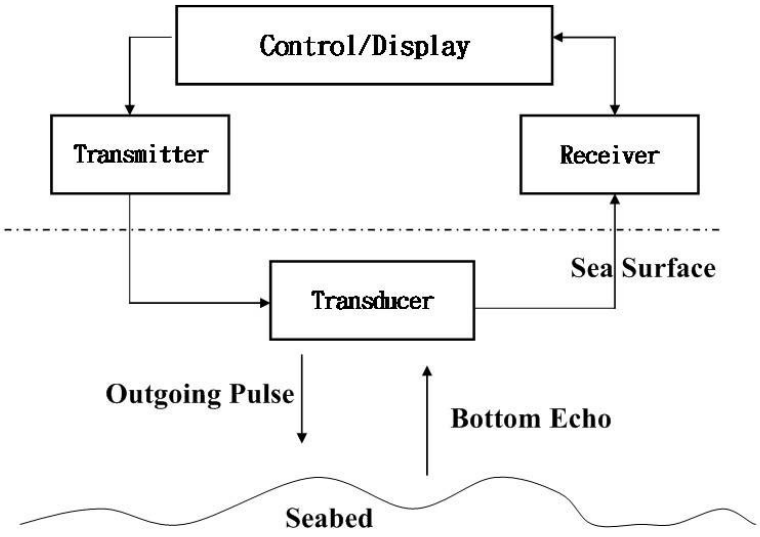


碼頭水下觀測

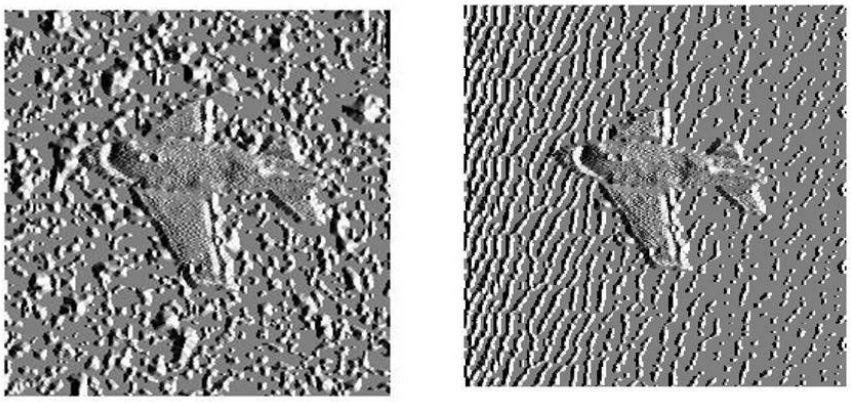


側掃聲納建置

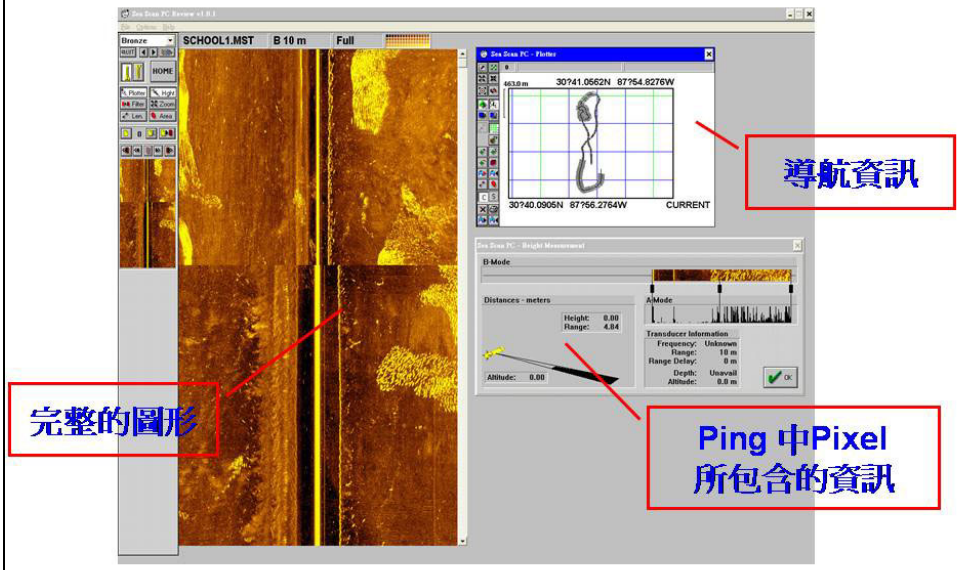
側掃聲納系統模擬



模擬聲納影像
（左圖：飛機殘骸與岩石底質
右圖：飛機殘骸與砂底質）

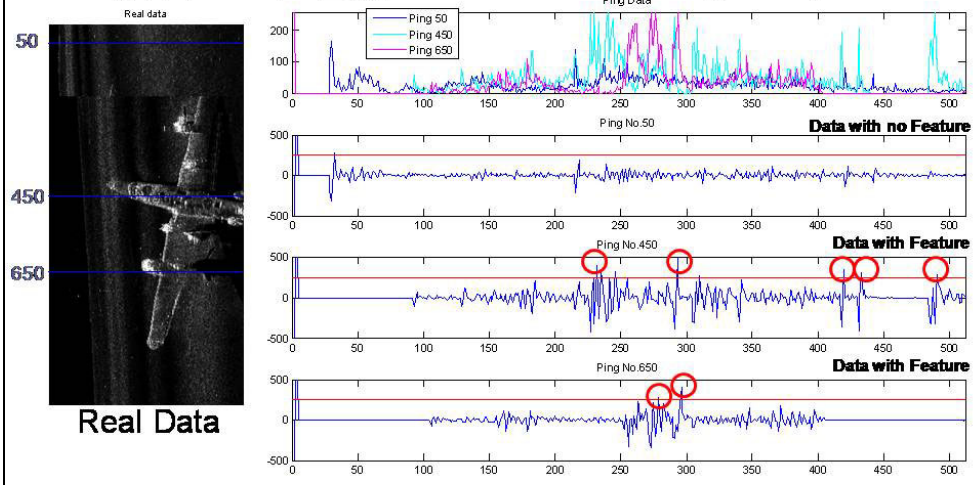


Sea Scan® PC Software



特徵偵測

根據Edge Detection的概念在一維的空間中使用垂直遮罩[-2 0 2]，因此Feature = Data * conv([-2 0 2])



結語

1. 本報告建立載具螺槳推力控制方法，用以控制載具之縱移、橫移、平擺及起伏等運動。運動控制使用比例微分及非線性回授，以克服模式誤差、水流干擾、纜線受力等未知力的影響。
2. 本報告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，以供運動控制器設計之用。
3. 導航方法採用測距聲納測量港灣結構物外形，經由數據擬合技術產生追蹤參考路徑，以供載具追蹤。
4. 本計畫目前正進行海域測試準備、以及側掃聲納界面設計與製作。