

98-66-7420
MOTC-IOT-97-H2DB009

水下結構物自動檢測系統研究 (4/4)



交通部運輸研究所
中華民國 98 年 5 月

98-66-7420
MOTC-IOT-97-H2DB009

水下結構物自動檢測系統研究 (4/4)

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 98 年 5 月

水下結構物自動檢測系統研究
(4/4)

交通部運輸研究所

GPN: 1009801338

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. (4/4) / 邱永芳
等箸.-- 初版. -- 臺北市：交通部運研所，
民 98.05
面；公分
參考書面：面
ISBN 978-986-01-8695-6(平裝)

1. 港埠工程 2. 海下工程 3. 自動化 4. 機器
人

351.9029

98009511

水下結構物自動檢測系統研究 (4/4)

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：10548 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 98 年 5 月
印 刷 者：良機事務機器有限公司
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網站
定 價：新臺幣 100 元
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880
國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207
五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1009801338

ISBN：978-986-01-8695-6 (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分內容者，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(4/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-01-8695-6（平裝）	政府出版品統一編號 1009801338	運輸研究所出版品編號 98-66-7420	計畫編號 97-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、呂柏諠、劉彥圻、 王偉翰 地址：臺北市羅斯福路4段1號 聯絡電話：02-33665739		研究期間 自 97 年 03 月 至 97 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。本報告為計畫第四年期之期末報告。本年度研究的目的是使用無人載具觀測防波堤，建立載具自動追隨防波堤沈箱之外形的能力，並與防波堤沈箱維持固定距離，以利水下觀測作業之施行。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。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，本研究設計一水下載具導航控制架構，提出路徑產生的演算法，本設計法則藉由感測器作即時的規劃，整合94,95,96年度所製作之原型機各元件與作業系統軟體程式，完成港灣結構物外形自動追蹤控制之海域實驗，以及結合影像位移與水下載具導航資料之水下影像拼嵌程序。本研究證實使用此架構之無人水下載具表現可符合結構物外形之追隨控制，對於載具的水下工作，諸如攝影、資料蒐集等具有實用價值。 成果效益： 1. 可針對各港務局進行防波堤水下結構物攝影、資料蒐集等工作，以替代潛水人員長時間水下作業。 2. 取得兩項「無人水下載具結構改良」及「具側掃聲納導航及目標物辨識功能之無人水下載具」中華民國專利證照。			
出版日期	頁數	工本費	本出版品取得方式
98 年 5 月	110	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: Study on a Robotic System for Underwater Structure Inspection (4/4)			
ISBN (OR ISSN) ISBN 978-986-01-8695-6 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009801338	IOT SERIAL NUMBER 98-66-7420	PROJECT NUMBER 97-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 2008 TO November 2008
RESEARCH AGENCY: NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY PRINCIPAL INVESTIGATOR: Guo Jen-hwa PROJECT STAFF: Chiu Forng-chen, Lu Bo-shiun, Liu Yen-ch, Wang Wei-han 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 research 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 equipment; 5. Ability to work over a long-range and for an extended-period of time; 6. Friendly interface to the operator. The report presents work done in year 4. 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 degrees-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. A navigation /control algorithm using feedback from distance measurement sonar is used to navigate the vehicle along the profile of an underwater structure. A robust controller was designed for the vehicle. Stability and performance of the control system was discussed. Furthermore, a Kalman filter estimator is used to combine image shifts with vehicle motion data to estimate the absolute position of the vehicle. In addition, crossover points between the current and former images are monitored. A smoothing process based on the Kalman filter technique along the reverse surveying path is employed to globally minimize the alignment errors in the image chains. The guidance, control performance of tracking an underwater structure profile, as well as the process of making an image mosaic presented here was then verified by experimental results.			
DATE OF PUBLICATION May 2009	NUMBER OF PAGES 110	PRICE 100	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

中文摘要·····	I
英文摘要·····	II
目 錄·····	III
圖 目 錄·····	V
表 目 錄·····	VIII
第一章 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[7]·····	1-3
1.4 第二年期主要成果[8]·····	1-4
1.5 第三年期主要成果[9]·····	1-4
1.6 本年期主要成果·····	1-4
第二章 載具系統與運動模式·····	2-1
2.1 載具系統·····	2-1
2.2 運動模型·····	2-3
2.3 參數鑑定·····	2-5
第三章 導航與控制器設計·····	3-1
3.1 導航器設計·····	3-1
3.2 控制器設計·····	3-3
3.3 穩定度分析·····	3-4

3.4 參考路徑·····	3-7
第四章 影像拼嵌·····	4-1
4.1 卡曼濾波設計·····	4-1
4.2 路徑交叉點檢視·····	4-3
4.3 後向平滑化處理·····	4-3
4.4 前向影像拼嵌實驗·····	4-4
4.5 前向拼嵌與後向平滑化實驗·····	4-10
第五章 結論與建議·····	5-1
5.1 結論·····	5-1
5.2 建議·····	5-2
參考文獻·····	6-1
附錄一 期中報告審查意見處理情形表·····	7-1
附錄二 期末報告審查意見處理情形表·····	8-1
附錄三 期中簡報資料·····	9-1
附錄四 期末簡報資料·····	10-1

圖 目 錄

圖 1 系統設計概念	1-2
圖 2 拋石觀測任務示意圖	1-3
圖 3 港研一號	2-2
圖 4 載具硬體架構	2-2
圖 5 控制與操作人機介面	2-3
圖 6 控制系統架構	2-3
圖 7 水下載具之座標軸(1)	2-4
圖 8 水下載具之座標軸(2)	3-3
圖 9 曲線的參考路徑	3-5
圖 10 預測距離臨界值	3-7
圖 11 載具位置	3-10
圖 12 載具平擺角	3-11
圖 13 平擺方向步階響應	3-11
圖 14 港灣結構物外形追隨	3-12
圖 15 港灣結構物水下觀測實驗	3-12
圖 16 由影像位移估測所得之拼嵌影像	4-5
圖 17 前向拼嵌影像	4-6
圖 18 y 方向之位置估測	4-7
圖 19 z 方向之位置估測	4-8
圖 20 y 方向之影像位移估測	4-8

圖 21 z 方向之影像位移估測·····	4-9
圖 22 共變異矩陣主軸數值隨時間之演變·····	4-9
圖 23 都卜勒聲納所推得之載具位置·····	4-10
圖 24 觀測對象水下管線之形狀與尺寸·····	4-11
圖 25 使用影像間位移資訊所拼嵌之水下管線影像·····	4-12
圖 26 y 方向之位置估測·····	4-13
圖 27 z 方向之位置估測·····	4-13
圖 28 y 方向影像位移估測·····	4-14
圖 29 z 方向影像位移估測·····	4-14
圖 30 前向拼嵌所得之水下管線影像·····	4-15
圖 31 位置誤差共變異矩陣之主軸數值·····	4-16
圖 32 都卜勒聲納推算之路徑，在路徑點旁所標示之數字為偵測到的交叉點·····	4-17
圖 33 平滑化後之 y 方向位置估測·····	4-18
圖 34 平滑化後之 z 方向位置估測·····	4-19
圖 35 平滑化後之 y 方向影像位移估測·····	4-19
圖 36 平滑化後之 y 方向影像位移估測·····	4-20
圖 37 第一回平滑化的影像位移共變異減少百分比·····	4-20
圖 38 第一回平滑化後之位置共變異矩陣之主軸數值·····	4-21
圖 39 第二回平滑化的影像位移共變異減少百分比·····	4-21
圖 40 第二回平滑化後之位置共變異矩陣之主軸數值·····	4-22

圖 41	第三回平滑化的影像位移共變異減少百分比·····	4-22
圖 42	第三回平滑化後之位置共變異矩陣之主軸數值·····	4-23
圖 43	第四回平滑化的影像位移共變異減少百分比·····	4-23
圖 44	第四回平滑化後之位置共變異矩陣之主軸數值·····	4-24
圖 45	第五回平滑化的影像位移共變異減少百分比·····	4-24
圖 46	第五回平滑化後之位置共變異矩陣之主軸數值·····	4-25
圖 47	第五回平滑化的影像位移共變異減少百分比·····	4-25
圖 48	第六回平滑化後之位置共變異矩陣之主軸數值·····	4-26
圖 49	經由前向拼嵌與後向平滑化處理後之水下管線拼嵌影像··	4-27

表 目 錄

表 1 載具主要規格·····	2-1
表 2 螺槳電壓與推力關係·····	2-7
表 3 載具參數估測數值·····	2-7
表 4 路徑交叉點偵測結果·····	4-17

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，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極具意義。圖 1 為本計畫之水下拖曳載具之設計概念。

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 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。

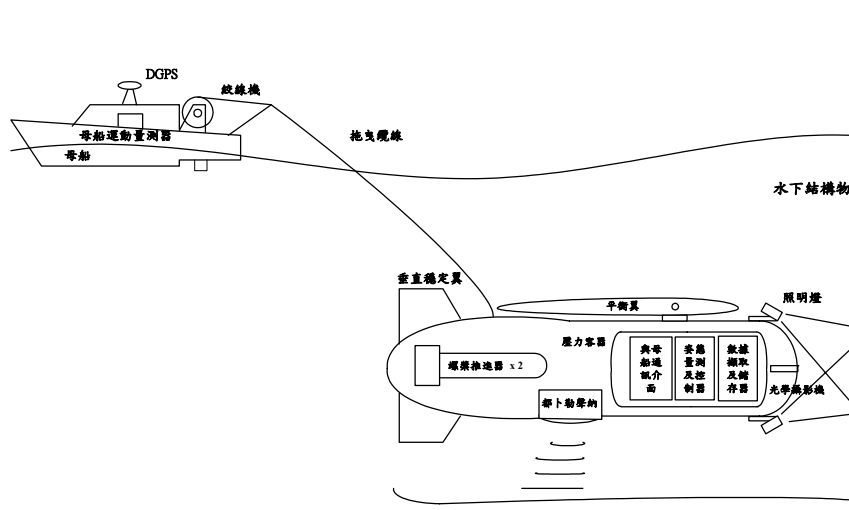


圖 1 系統設計概念

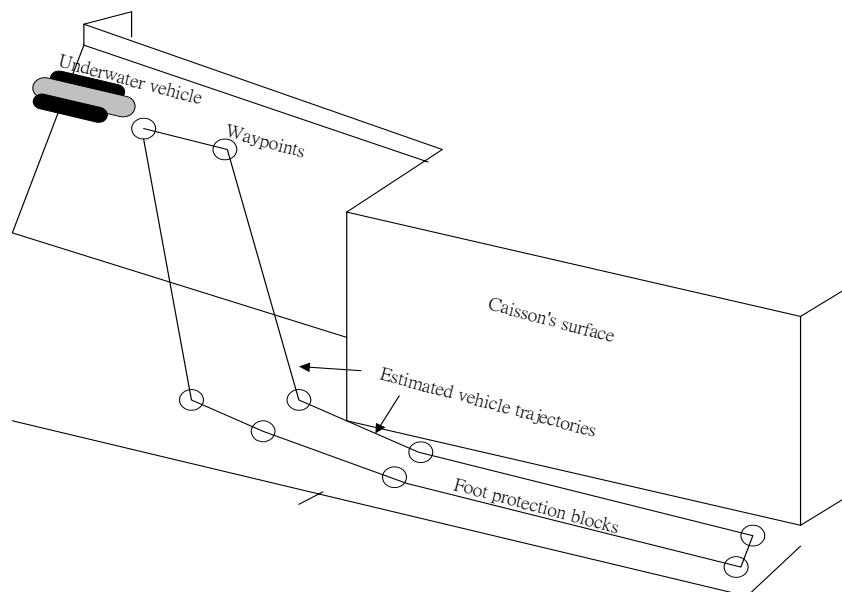


圖 2 拋石觀測任務示意圖

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、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 第三年期主要成果[9]

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、與側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。

1.6 本年期主要成果

本計畫為第四年期，本期之主要研究課題為載具原型的全系統測試與實作驗證。本年度使用前三年度製作之原型機，測試港灣水下結構物觀測作業系統所需之軟硬體。以港口防波堤的水下表面觀測作業確認系統的功能正常，並發展港灣結構物外形追蹤的控制模式，以自動控制及自動產生路徑，蒐集港灣結構物水下觀測數據，建立使用自主式載具觀測水下結構物之操作方法。

第二章 載具系統與運動模式

本章組織如下:2.1 節描述載具系統設計、2.2 節敘述載具數學模型、2.3 節討論載具的參數鑑定，以最小平方法來分析實驗所取得的運動資料，以獲取載具運動參數。

2.1 載具系統

港灣防波堤經常承受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。本研究的目的為使用無人載具觀測防波堤，建立載具自動追隨防波堤沈箱之外形的能力，並與防波堤沈箱維持固定距離，以利水下觀測作業之施行。港研一號(圖 3)，長度 1 公尺、寬度為 0.7 公尺、高度為 0.55 公尺、重約 90kg，配置的感測器有都卜勒測速聲納(Doppler Velocity Log)、側掃聲納(Side Scan Sonar)、高度計(Altimeter)、水下攝影機以及照明設備；動力裝置由 4 具 1HP 的螺槳組成[10][11]。載具內部的配置有 DC-DC 轉換器、單晶片處理器、PC104、通訊模組(RS232、RS485、無線網路卡)、DA 驅動卡、繼電器、以及側掃聲納模組。與岸上電腦通訊方式請參閱圖 4，經由纜線可即時取得載具的姿態、水下的影像、與障礙物的距離、水下地貌，圖 5 為開發完成的人機介面之組成圖。設計規格如表 1 所示。系統的架構如圖 6 所示。

表 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

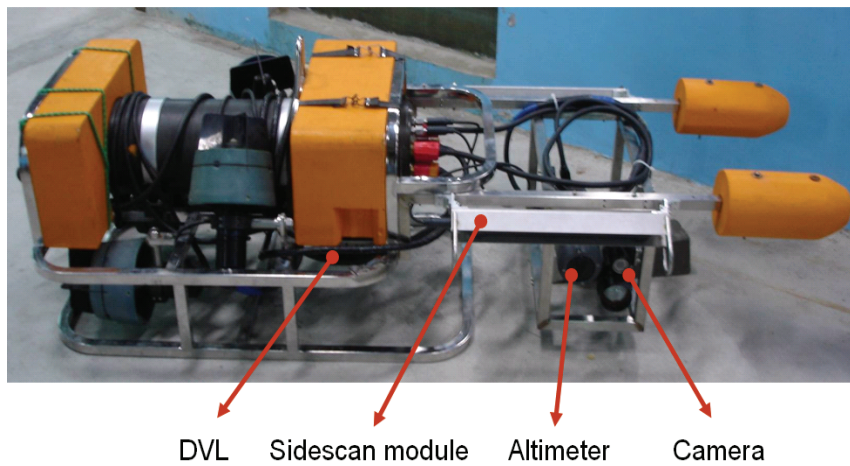


圖 3 港研一號

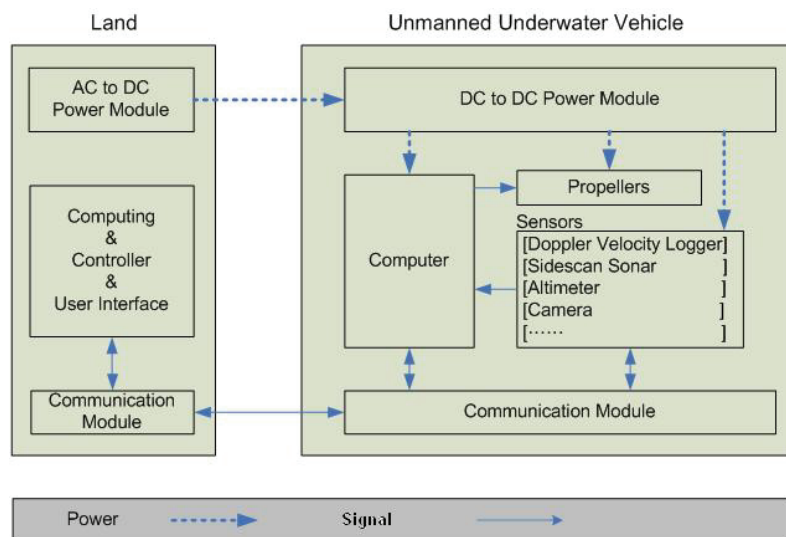


圖 4 載具硬體架構

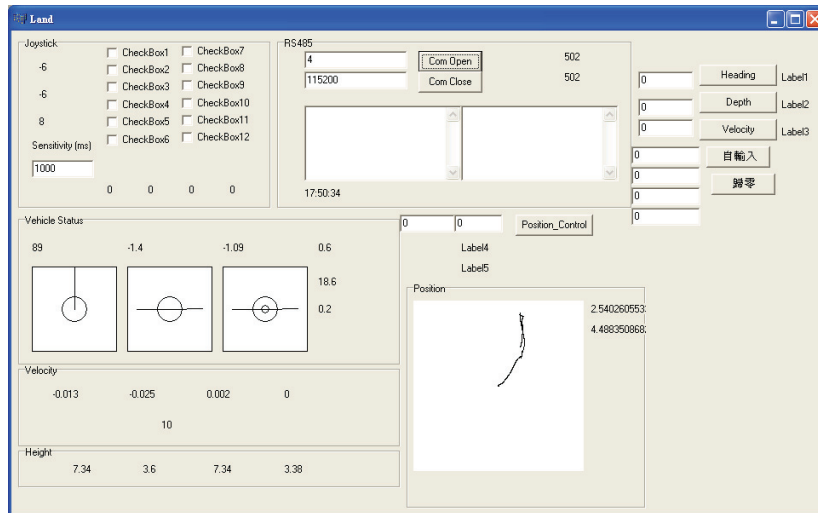


圖 5 控制與操作人機介面

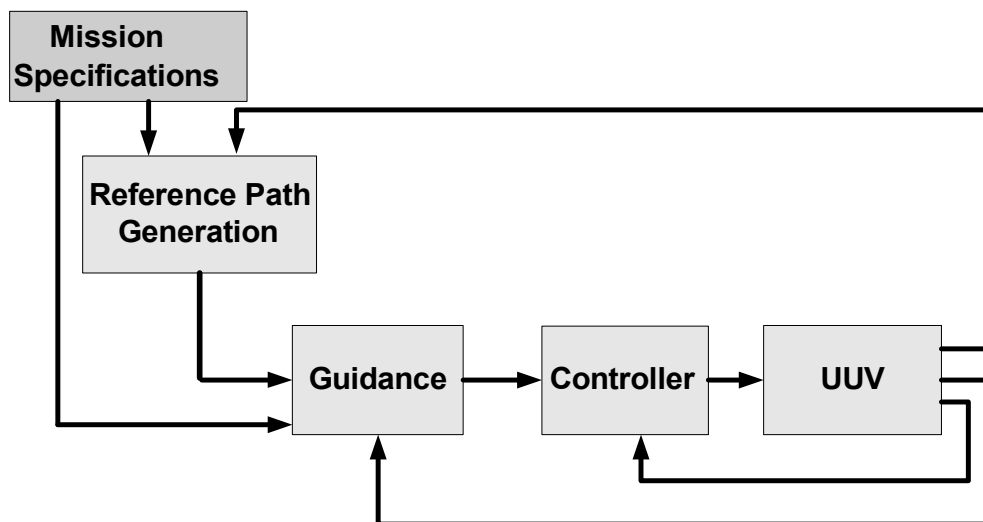


圖 6 控制系統架構

2.2 運動模型

載具使用兩個座標系來描述其平面運動。一為空間座標系 (earth-fixed coordinate system)，另一為載具座標系 (vehicle-fixed coordinate system)，如圖 7 所示，其符號定義皆與一般船舶所使用者相同[12]。 x, y 代表平面二維座標軸， ψ 代表載具之平擺角。座標軸原

點設在都卜勒聲納之原點，以便於運動訊號的處理。

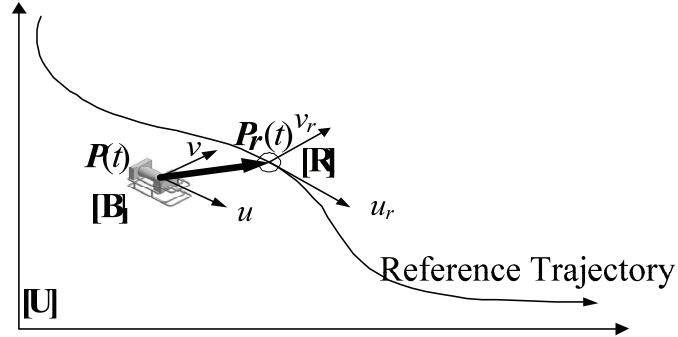


圖 7 水下載具之座標軸(1)

由於載具的形狀不對稱，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的解表示水下載具之開回路系統動態，假設載具在各維度以低的速度（即接近為 0 的速度）運動，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。所以每一個自由度均可以被單獨控制，互相不干擾，則平面動態行為的載具模型可以表示如下：

$$\begin{aligned} m_u \dot{u} + b_u u + c_u u^2 &= f_u \\ m_r \dot{r} + b_r r + c_r r^2 &= f_r \end{aligned} \quad (1)$$

其中 u 、 r 分別為縱移速度及平擺角速度， m_u 為載具在縱移方向之質量及附加質量， m_r 為平擺之轉動慣量； b_u 、 c_u 分別為縱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； f_u 為螺槳推力， f_r 為螺槳推力差所形成的轉矩。

本文導航方式分為前進、水平面轉動、與垂直面升降等三軸之獨立控制。考慮平擺方向的載具模型，在微小轉動速度下，因為線性阻尼項係數對系統的影響相對二次阻尼項係數為小，當載具低速運動

時，對於操作角速度附近的載具模型(1)線性化，簡化其分析，而由系統鑑定實驗結果可知其為一合理模型，可以表示如下：

$$m_r \dot{r} + 2c_r r = f_r \quad (2)$$

將上式表示為平擺角速度與推力的關係：

$$\frac{r}{f_r} = \frac{\frac{1}{m_r \dot{r}}}{s + \frac{2c_r}{m_r \dot{r}}} = \frac{b}{s - a} \quad (3)$$

或

$$\dot{r} = ar + bf_r, \quad \dot{\phi} = r \quad (4)$$

2.3 參數鑑定

考慮任一方向，單自由度載具模型，可表示如下：

$$m\dot{v} + bv + cv^2 = f \quad (5)$$

其中 v 為運動方向上的速度， m 、 b 、 c 為運動方向之慣性係數、一次與二次之阻尼係數， f 乃由配置於運動方向螺槳推力所合成。 f 所表示之推力定義為：

$$f = t \cdot \bar{f} \quad (6)$$

上式中， t 定義為運動方向之推力減少係數，在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%。 f 之數值是由運動控制器所設定， $\bar{f}$ 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， $\dot{v}=0$ 。若輸入一系列不同數值之常數推力，

則參數 b 、 c 可以最小平方差法求得[1]，輸入 N 組不同的推力，可表示為：

$$\begin{bmatrix} v_1 & v_1|v_1| \\ \vdots & \vdots \\ v_i & v_i|v_i| \\ \vdots & \vdots \\ v_N & v_N|v_N| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_i \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix}, \quad i=1,2,\dots,N \quad (7)$$

b 、 c 為待解之參數，在運動之正方向與負方向，其數值可能不同。解得這些參數後，再將其數值代入運動模型，以便推求模型中的慣性係數 m 。慣性係數之推求方法，可以將運動模型(5)對操作速度 v^* 做線性化，其結果為一階模型：

$$m\dot{v} + kv = f \quad (8)$$

上式中， $k = b + 2c|v^*|$ 。在常數推力輸入下，量測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：

$$t_c = m/k \quad (9)$$

水槽實驗由不同的運動方向及運動速度下，得到不同的動態反應數據，建立載具水平面及垂直面之模型係數，表示水下載具之開回路系統動態，以做為動態模擬的基礎，各自由度之螺槳電壓指令與推力之關係如表 2 所示[13]。表 3 所示所鑑定的系統模型參數實驗數據，上標‘+’及‘-’分別表示參數的正方向、負方向的運動數據[14]。

表 2 螺槳電壓與推力關係

Voltage	Surge (N)	Sway (N)	Heave (N)	Yaw ($N \cdot m$)
0.7	1.56	0.39	1.35	0.29
0.8	2.35	0.58	2.03	0.43
0.9	3.13	0.78	2.71	0.58
1	3.92	0.98	3.39	0.72
1.5	9.81	2.45	8.49	1.81
3	68.67	17.16	59.46	12.70

表 3 載具參數估測數值

	Surge	Sway	Heave	Yaw
線性阻尼(+)	4.26	5.95	10.55	1.76
二次阻尼(+)	46.07	514.57	63.49	6.51
線性阻尼(-)	9.55	3.59	10.70	0.76
線性阻尼(-)	62.26	327.89	219.71	11.15

第三章 導航與控制器設計

本章 3.1 節定義載具追隨控制器的架構、3.2 節說明控制器設計方法、3.3 節則藉由穩定性的分析，找到該如何決定追隨控制器所需之預視距離、3.4 節藉由預視距離的分析及所提出的演算法，完成追隨控制器參考路徑的規劃與控制。

3.1 導航器設計

載具動態是由一姿態向量 p 來描述， p 為時間 t 之函數。

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 x ， y 是空間座標系之位置座標， φ 是載具之平擺角。定義載具之零姿態為 $[0 \ 0 \ 2n\pi]^T$ ， n 為整數。載具的運動，是由載具座標系之線速度 u 與角速度 r 所決定，載具在空間座標系的運動狀態可經由一座標轉換矩陣 J 獲得

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \dot{p} = Jq = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 \\ \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} q \quad (11)$$

其中 $q = [u \ r]^T$ 。在導航方法中，吾人定義參考姿態向量 $p_r = [x_r \ y_r \ \varphi_r]^T$ 以及目前載具之姿態向量 $p = [x \ y \ \varphi]^T$ 。 p_r 為 p 所追隨的目標姿態，根據(圖 8)其位於載具前方固定的距離 d ，定義此為預測距離，而參考平擺角 φ_r 即為 LOS (line of sight) 定義如下

$$\varphi_r = -\tan^{-1} \frac{y}{d} \quad (12)$$

定義姿態誤差 p_e 為 p_r 及 p 之差，並經過一轉換矩陣 T_e 所構成，此轉換矩陣 T_e ，將定義於空間座標系之參考姿態及目前載具之姿態向量，重新定義於載具座標系之上。

$$p_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \phi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (p - p_r) = T_e (p - p_r) \quad (13)$$

導航的問題可經由圖 8 做一描述。導航器輸入為 p_r 、 p 、參考速度 $q_r = \begin{bmatrix} u_r & r_r \end{bmatrix}^T$ ，導航器輸出則為空間座標系上之 p_e 及其對時間微分 $\dot{p}_e$ [15]。

$$\dot{p}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\phi}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - y_e r - u_r \cos \phi_e \\ x_e r - u_r \sin \phi_e \\ r - r_r \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中 $u = \dot{x} \cos \phi + \dot{y} \sin \phi$ ； $u_r = \dot{x}_r \cos \phi_r + \dot{y}_r \sin \phi_r$ 。

根據 p_e 及 $\dot{p}_e$ ，使用下節所推導的控制方式，可以使載具追隨所規劃之路徑。當載具速度低速時，假設載具在 y 方向速度的變化表示如下

$$\dot{y} = \sin \phi \quad (15)$$

上式可用來做為載具目標點追隨之導航律。

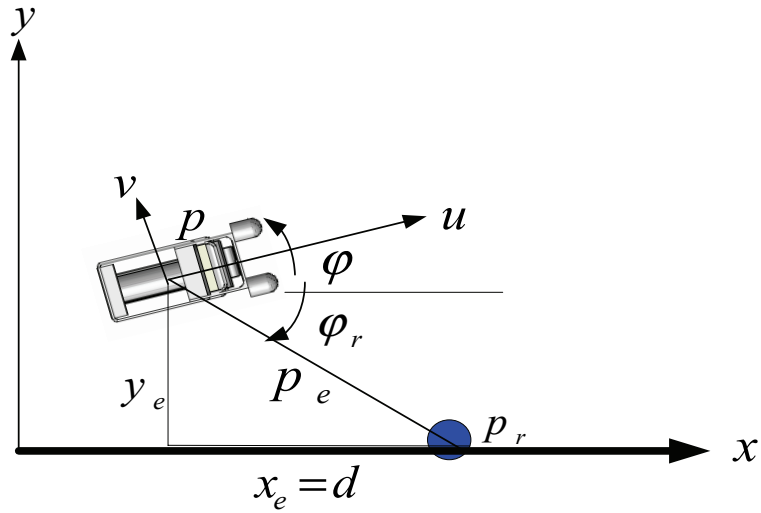


圖 8 水下載具之座標軸(2)

3.2 控制器設計

載具的控制器，由導航器計算所得的姿態誤差 p_e 及其微分 $\dot{p}_e$ 作為輸入，經由控制器輸出命令推力 f ，推動載具螺槳做位置及方向角控制，過程中經由導航系統測得取樣時間的位置、速度、方向角等資料，作為回授 p ，完成整個載具導航控制器之閉迴路。控制器的設計，主要的目的，是利用比例-微分（P-D）加上飽和函數控制的方法：

$$f_{ro} = k_p \phi_e + k_d \dot{\phi}_e \quad (16)$$

$$f_r = f_{sat} \tanh\left(\frac{f_{ro}}{f_{sat}}\right) \quad (17)$$

上式 f_r 在原點的斜率即為 f_{ro} ，且 f_{sat} 為輸出推力飽和上限，限制了最大的輸出推力。由於為一連續函數的特性，使得輸出推力較為平滑，系統將能夠準確的作動。根據導航器與控制器，系統的特性方程式由(4)(16)可得如下表示：

$$s^2 - (a + bk_d)s - bk_p = 0 \quad (18)$$

s 為拉普拉司變數。藉由選擇不同的自然頻率以及阻尼係數，得到所希望的系統響應，可做為控制器參數的設計基礎：

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (19)$$

控制器參數可得如下表示：

$$k_p = -\frac{\omega_n^2}{b}, \quad k_d = -\frac{a + 2\zeta\omega_n}{b} \quad (20)$$

經由上面的控制器可以穩定所給定的參考平擺角，並且藉由縱向控制，可追隨著參考路徑。這個以比例-微分加上飽和函數的控制方式，能夠改善暫態響應，並且可以簡單的決定出控制增益的關係，在水下載具導航控制器的設計上，能夠提供設計者一個方便有效的方法。

3.3 穩定度分析

由於參考路徑點在載具的前方，必須決定須落在載具前方多遠處，系統將可保持穩定的航行，此即為預測距離。藉由分析系統的穩定度，可得到預測距離與系統響應的關係，作為其相對的準則[16][17]。當參考路徑由片段連續的曲線構成時，且為相同的曲率 R ，而參考平擺角 φ_r (圖 9) 所示即為 LOS (line of sight) 表示如下：

$$\tan \varphi_r = \frac{y - R \sin \beta}{x - R \cos \beta} \quad (21)$$

其中 $\beta = \tan^{-1}(\frac{y}{x}) - \frac{d}{R}$ 帶入式上可得：

$$\tan \varphi_r = \frac{y(x^2 + y^2)^{1/2} - R[y \cos(d/R) - x \sin(d/R)]}{x(x^2 + y^2)^{1/2} - R[x \cos(d/R) + y \sin(d/R)]} \quad (22)$$

假設系統於穩態時，載具橫移運動方向在參考路徑上的誤差為零，所以載具平擺角速度及載具位置表示如下：

$$\begin{aligned} r_s &= \frac{1}{R} \\ x_s &= R \cos(r_s t), y_s = R \sin(r_s t) \end{aligned} \quad (23)$$

(23)帶入(22)可得：

$$(\varphi_r)_s = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(d/R)}{1 - \cos(d/R)}\right) + \frac{1}{R}t \quad (24)$$

由於希望穩態時能夠準確的在參考路徑上，因此增加了前授回饋控制，增加了系統穩態的穩定性，控制器可表示如下：

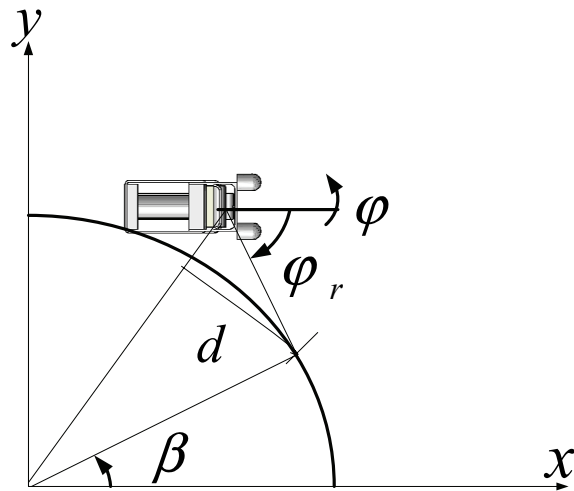


圖 9 曲線的參考路徑

$$f_{ro} = k_p \varphi_e + k_d \dot{\varphi}_e + k_0 \quad (25)$$

回授控制器參數可以由前面求得(20)，而前授回饋控制器參數為可得如下表示：

$$-k_p \tan^{-1}\left(\frac{\sin(d/R)}{1-\cos(d/R)}\right) + \frac{k_d}{R} + k_0 = -\frac{a}{b} \frac{1}{R} \quad (26)$$

根據上面導航器與控制器的分析(4)(15)(25)，載具在穩態時完整的系統可表示如下：

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= r \\ \dot{r} &= ar + b \left[k_p (\varphi - \sigma) + k_d r \right], \quad \sigma = r - r_0 \\ \dot{y} &= \sin \varphi \end{aligned} \quad (27)$$

其中 $\tan r = \frac{R \sin(d/R)}{R + y_1 - R \cos(d/R)}$, $\tan r_0 = \frac{\sin(d/R)}{1 - \cos(d/R)}$,

y_1 為載具與參考路徑的交越追蹤誤差 (cross track error) $y_1 = \left(x^2 + y^2 \right)^{1/2} - R$ 。在此對於系統(27)平衡點 ($\varphi = r = y = 0$) 附近做穩定性的分析，因此當系統臨界穩定時，可得預測距離，表示如下：

$$d_{crit}^R = 2R \tan^{-1}\left(\frac{d_{crit}}{2R}\right) < d_{crit} = \frac{1}{2\zeta\omega_n} \quad (28)$$

而 d_{crit} 為參考路徑為直線其臨界預測距離，對於 $d > d_{crit}^R$ 所有的根會在左半平面，系統將漸進穩定，而當 $d < d_{crit}^R$ 時，損失了系統的穩定性，因此控制器須有夠高的頻寬，才可確保系統的穩定度。由上可知 $d_{crit}^R < d_{crit}$ ，在參考路徑為直線時，穩定的導航器與控制器，也將保證曲線路徑的穩定。根據(28)式，在不同的系統阻尼比，其預測距離與自然頻率的關係如圖 10 所示。

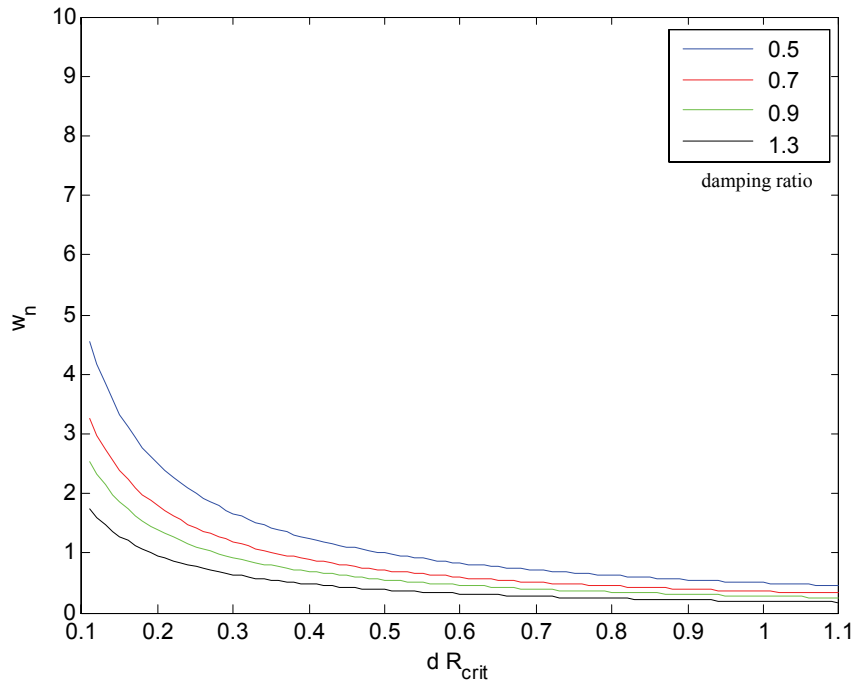


圖 10 預測距離臨界值

3.4 參考路徑

由系統的穩定性分析，得到預測距離的準則，此距離也就是參考路徑所需間隔的距離，而在載具設計上，必須即時量測結構物位置，做為載具追隨的參考路徑，因此感測器擺放的位置也需要符合此長度，稱此為預測長度。

平滑的參考路徑較利於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，本文使用 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[18]：

若 $x(l)$, $y(l)$ 為曲線上的位置向量，則沿著參數 l 的 B-spline 曲線可定義為：

$$\begin{aligned}
x(l) &= \sum_{k=0}^N C_{x,k} B_{k,D}(l) \\
y(l) &= \sum_{k=0}^N C_{y,k} B_{k,D}(l) , \quad l_0 \leq l < l_N \\
&\quad , \quad 2 \leq k \leq N
\end{aligned} \tag{29}$$

其中 l 為參考路徑之長度參數， $C_{x,k}, C_{y,k}$ 為控制點位置向量，個數為 $N+1$ 。 $B_{k,D}(l)$ 則是正規化的 B-spline 基底函數，在階數為 k 時，第 D 個基底函數 $B_{k,D}(l)$ ，此即 Carl de Boor formulas，定義為：

$$B_{k,1}(l) = \begin{cases} 1 & \text{if } l_k \leq l < l_{k+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{30}$$

及

$$\begin{aligned}
B_{k,d}(l) &= \frac{l - l_k}{l_{k+d+1} - l_k} B_{k,d-1}(l) + \\
&\quad \frac{l_{k+d} - l}{l_{k+d} - l_{k+1}} B_{k+1,d-1}(l)
\end{aligned} \tag{31}$$

$d = 2 \cdots D$ ， l_k 為節點向量(knot vector)中的第 k 個元素，且 $l_k \leq l_{k+1}$ ， $l_0 \leq l \leq l_N$ 。

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[8]：

1. 儲存載具上感測器收到的資料，例如：測距聲納置於載具座標原點 0.5 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 2 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 $c(l)=[x(l) \ y(l)]^T$ 呈現出障礙物的輪廓。
3. 其偏移點所形成之路徑控制點可能互相重疊，所以需移除重疊的資料點
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：

$$n(l) = \frac{1}{\sqrt{x'(l)^2 + y'(l)^2}} \begin{bmatrix} x'(l) \\ -y'(l) \end{bmatrix} \quad (32)$$

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：

$$c_r(l) = c(l) + s_D n(l) \quad (33)$$

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 $c_r(l_r) = (x(l_r), y(l_r))$ 。進而計算參考路徑座標系中之曲率 κ_r 、參考角速度 r_r 。

$$\kappa(l_r) = \frac{x''(l_r)y'(l_r) - y''(l_r)x'(l_r)}{(x'(l_r)^2 + y'(l_r)^2)^{3/2}} \quad (34)$$

$$r_r = \kappa(l_r)u_r \quad (35)$$

根據上面所提出之路徑規劃、路徑追蹤與運動控制系統之全系統架構 (圖 6)，利用載具模型進行模擬，因此選擇自然頻率及阻尼，決定載具感測器須放置的位置，此即為預測長度，當預測長度為 0.6 公尺時，(圖

10) 右上角標示由上往下依序為障礙物的輪廓、載具位置、規劃參考路徑、感測器量測的情形，載具的位置及平擺角都能追隨所規劃出的參考路徑，得知此架構之性能表現為可行，未來將實際應用於無人水下載具上。

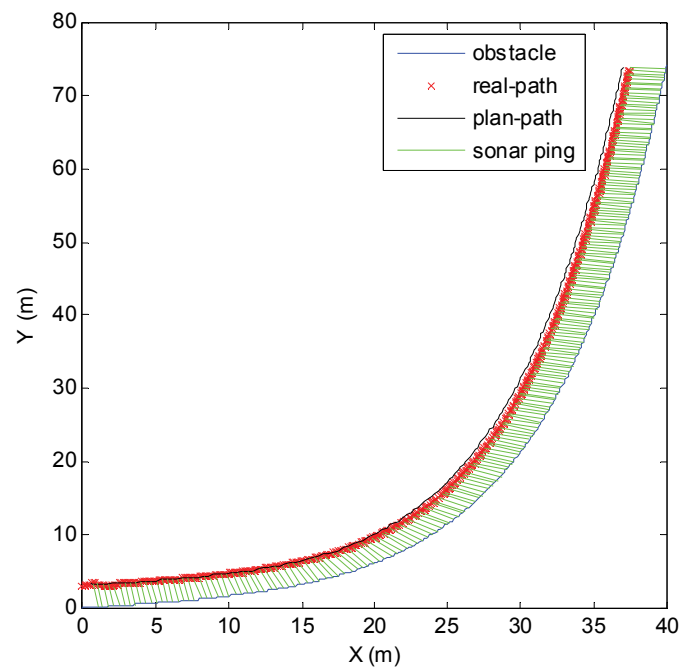


圖 11 載具位置

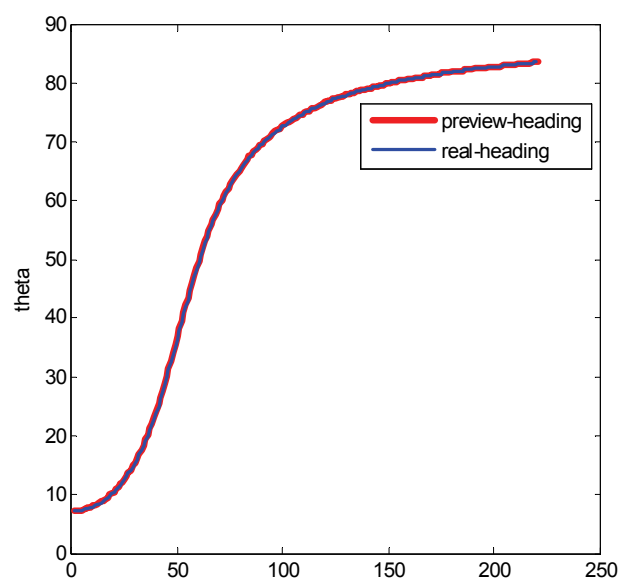


圖 12 載具平擺角

由實驗參數估測得到的系統模型，並藉選擇希望的系統阻尼及自然頻率作為控制器參數的準則，在平擺方向上，選擇希望的系統阻尼為 $\zeta=1.5$ 和自然頻率 $\omega_n=1$ ，然後給定一個步階的命令，即參考角度為110度，系統的響應呈現如圖12。

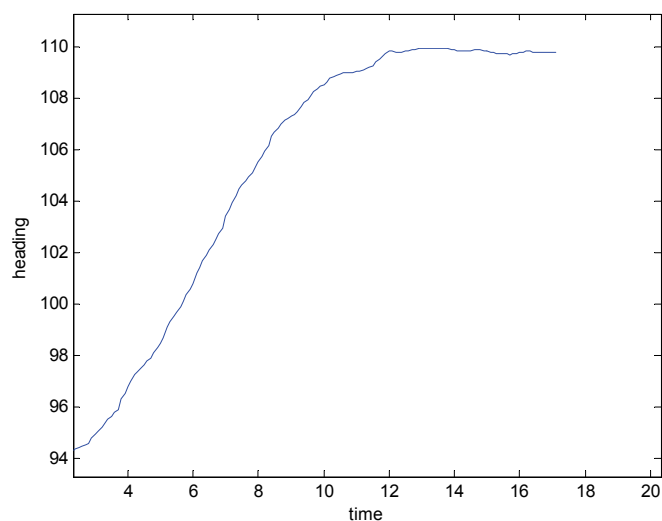


圖 13 平擺方向步階響應

圖 13,14,15 分別為港灣結構物觀測實驗之數據與實驗照片。圖 13 中，使用本研究所提出之路徑規劃方法，可以即時根據測距聲納量測數值，經由數值均化、B-spline 曲線擬合等過程，並根據預視距離之設計，選取路由點。此方法已經在水槽與港灣測試中驗證具有很好的強健性及控制性能。

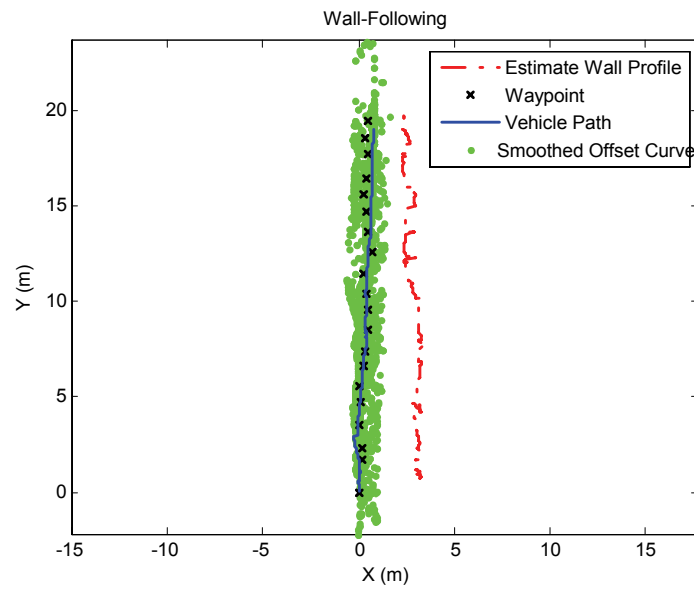


圖 14 港灣結構物外形追隨



圖 15 港灣結構物水下觀測實驗

第四章 影像拼嵌

本章敘述載具擷取水下影像以拼嵌成大幅水下影像之過程。拼嵌過程分為：前向拼嵌處理與後向影像平滑化兩階段。前向拼嵌使用以卡曼濾波器為架構之濾波程序，藉由估測載具位移做影像之拼嵌；載具位移之估測由都卜勒聲納所量得之速度資訊，與影像之位移資料整合。最後，經由影像與估測位移尋找載具路徑中交叉點的位置，做後向的路徑平滑化處理，以求得更為準確的位置估測值。

4.1 卡曼濾波器設計

本節敘述估測載具位移之卡曼濾波設計程序。令狀態 $\mathbf{x}_k$ 的動態模式為：

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (36)$$

上式中， $\mathbf{u}_k$ 為輸入訊號， $\mathbf{w}_k$ 代表白高斯雜訊，而 $\mathbf{A}_k$ 為狀態轉換矩陣。量測值 $\mathbf{z}_k$ 可以下列等式描寫：

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_K \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (37)$$

$\mathbf{H}_K$ 為量測矩陣， $\mathbf{v}_k$ 則為白高斯量測雜訊。系統狀態的定義式如下所示：

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} {}^T y_{Tl_k} & {}^T z_{Tl_k} & \delta u & \delta v \end{bmatrix}^T \quad (38)$$

${}^T y_{Tl_k}, {}^T z_{Tl_k}$ 各為載具在水平與垂直方向在時間 k 之位置， $\delta u, \delta v$ 定義為影像特徵在影像平面上的位移，則狀態轉移矩陣可寫為：

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & a & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

上式中， a, b 為相機模式常數。卡曼濾波器之時間與量測更新方程式如下

$$\mathbf{z}_k = \arg \min_{\hat{\mathbf{s}}} C_k \quad (40)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^{f-} = \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_k^f \quad (41)$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^{f-} = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_k^f \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (42)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k^f = \hat{\mathbf{x}}_k^{f-} + \mathbf{K}_k^f (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^{f-}) \quad (43)$$

$$\mathbf{K}_k^f = \mathbf{P}_k^{f-} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^{f-} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (44)$$

$$\mathbf{P}_k^f = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^f \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^{f-} \quad (45)$$

上式代表狀態與誤差共變異矩陣隨時間的演繹過程。狀態由運動模式所估測，卡曼增益則加入量測 $\mathbf{z}_k$ 。量測值為可使下式 C_k 為最小的載具位移。

$$C_k = [\mathbf{s}_k - \hat{\mathbf{s}}_k]^T [\mathbf{s}_k - \hat{\mathbf{s}}_k] + [\mathbf{s}_{vk} - \hat{\mathbf{s}}_k]^T [\mathbf{s}_{vk} - \hat{\mathbf{s}}_k] \quad (46)$$

$\mathbf{s}_k = (\delta u, \delta v)_k$ ， $\hat{\mathbf{s}}_k$ 為 $\mathbf{s}_k$ 之估測值， $\mathbf{s}_{vk}$ 代表載具量測所得之位移。 C_k 之第一項所考慮者為影像特徵之位移與估測位移的誤差，而第二項則為都卜勒聲納所量測之位移與估測位移之誤差。 $\mathbf{z}_k$ 為由影像位移量所組成之 2×1 向量，因此，量測矩陣可寫成下式：

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (47)$$

式 (44) 中，時間更新式所需之方程式如下：

$$\mathbf{R}_k = \text{cov}[\bar{\mathbf{x}}_{(3,4)k} - \hat{\mathbf{x}}_{(3,4)k}^f] = \left[\mathbf{J}_k + (\mathbf{P}_{(3,4)k}^{f-})^{-1} \right]^{-1} \quad (48)$$

上式中， $\bar{\mathbf{x}}_{(3,4)k}$ and $\hat{\mathbf{x}}_{(3,4)k}^f$ 為狀態向量第三與第四元素之真實與估測變數。 $\mathbf{J}_k$ 為其費雪資訊矩陣(Fisher's information matrix)，而 $\mathbf{P}_{(3,4)k}^{f-}$ 代表狀態 denotes $\hat{\mathbf{x}}_{(3,4)k}^{f-}$ 之共變異矩陣。費雪矩陣的計算式如下：

$$\mathbf{J}_k = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{x=0}^{n_x-1} \sum_{y=0}^{n_y-1} \left[\nabla_s I_k(x + \delta u, y + \delta v) \Big|_{s=(\delta u, \delta v)} \right] \times \left[\nabla_s I_k(x + \delta u, y + \delta v) \Big|_{s=(\delta u, \delta v)} \right]^T \quad (49)$$

$(\delta u, \delta v)$ 為影像位移向量， I_k 則為影像在時間 k 之強度。

4.2 路徑交叉點檢視

利用影像位移估測估測載具路徑所累積之路徑估測誤差，可藉由路徑點交叉偵測而降低誤差的量。此方法是利用載具重複回到之前的位置，形成路徑上的迴圈，藉著對同一個環境特徵重複的觀測，來抵銷在此位置上前後兩次位置估測的誤差累積。路徑交叉點的檢視方法是針對該幅影像，計算目前的影像與其相對距離，如果此距離小於該幅影像之可能的範圍之內，則標示此兩幅影像為重疊。考慮路徑重疊之不等式如下所示：

$$\begin{aligned} \text{If } & \left| {}^T y_{TI}(n) - {}^T y_{TI}(k) \right| < aw + m\sigma_y \\ & \left| {}^T z_{TI}(n) - {}^T z_{TI}(k) \right| < bh + m\sigma_z \\ \text{Then } & \text{correlate image}(k) \text{ with image}(n) \end{aligned} \quad (50)$$

其中， $m\sigma_y, m\sigma_z$ 定義 image (k) 與 image (n) 在 y 及 z 方向位置估測之 m 個標準差。 w 、 h 各為影像平面之寬度及高度， ${}^T y_{TI_k}, {}^T z_{TI_k}$ 則為狀態向量中之載具位置。

4.3 後向平滑化處理

後向平滑化處理之目的為重新拼排前向拼嵌所得之影像，使其估測位置之變異進一步降低，以提升拼嵌影像之一致性。平滑化處理自路徑交叉點起始，背向著時間順著影像拼嵌之鍊結做位置估測，估測之進行會使用到所有之前的量測向量數值，並與之前估測之位置做平均，重新估測出所有之前的位置估測數值。平滑化的過程中，以最佳

化方法結合前向拼嵌在時間 t_k 所得之資料 $\hat{\mathbf{x}}_k^{f-}$, $\hat{\mathbf{x}}_k^f$, $\mathbf{P}_k^{f-}$, 及 $\mathbf{P}_k^f$, 以後向計算時自時間 t_N 起, 所得之後向估測值。其運算式如下所示: (式中上標 f 代表前向數值)

$$\mathbf{P}_N = \mathbf{P}_N^f, \hat{\mathbf{x}}_N = \hat{\mathbf{x}}_N^f \quad (51)$$

$$\mathbf{F}_k = \mathbf{P}_k^f \mathbf{A}^T (\mathbf{P}_{k+1}^{f-})^{-1} \quad (52)$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^f - \mathbf{F}_k (\mathbf{P}_{k+1}^{f-} - \mathbf{P}_{k+1}^f) \mathbf{F}_k^T \quad (53)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^f + \mathbf{F}_k (\hat{\mathbf{x}}_{k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^{f-}) \quad (54)$$

$\mathbf{F}_k$ 是平滑過程的增易舉鎮矩陣, 後向處理之時間序為 $k = N-1, N-2, \dots$. 而後向之處理過程與量測數據與輸入皆為無關。

4.4 前向影像拼嵌實驗

圖 16 及 17 為同一次實驗所得之 23 張連續影像的拼嵌結果。水下載具沿著港灣牆壁下沉, 與壁面維持 70 公分距離, 而相機之朝向角度則由自動控制程式保持其固定的角度。圖 16 所示為採用影像資訊中的影像位移所得拼嵌影像。由於水下影像通常因光線不足而較為灰暗, 以及特徵不明顯等因素, 而造成影像位移之估測誤差, 由圖 16 亦可見由影像位移所求得之拼嵌圖有明顯的邊緣不整齊。

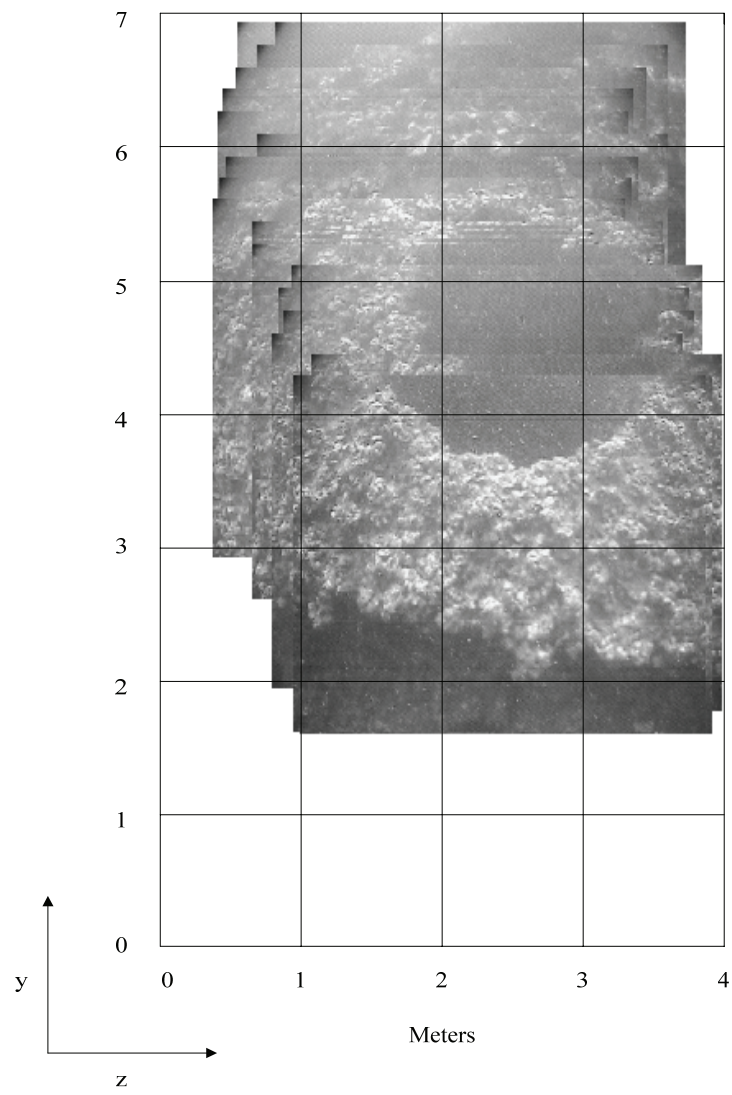


圖 16 由影像位移估測所得之拼嵌影像

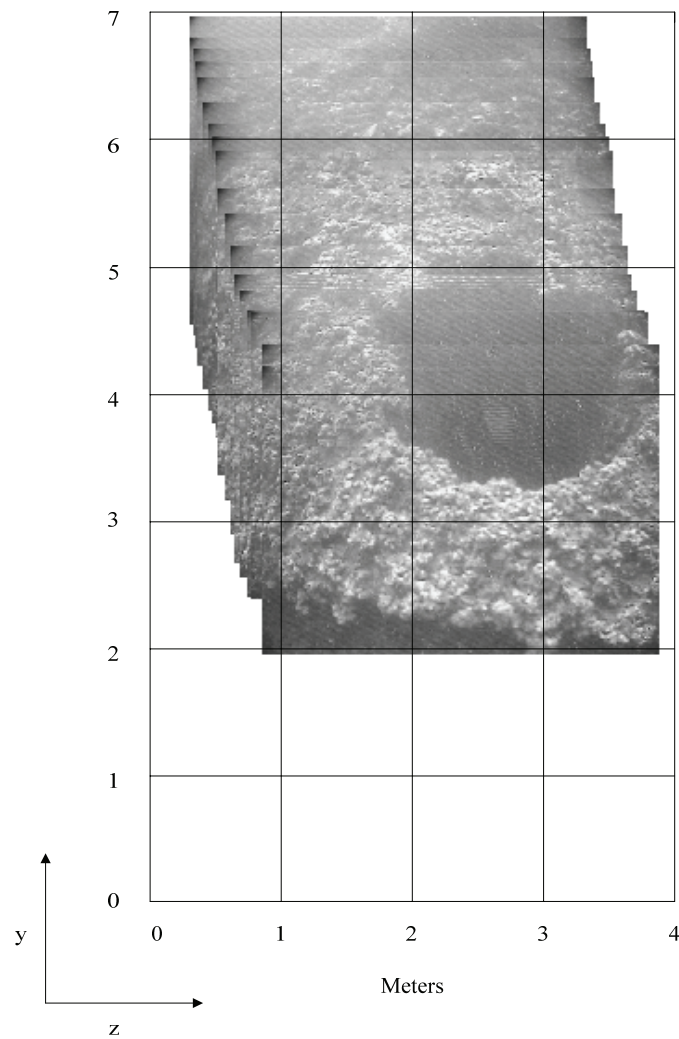


圖 17 前向拼嵌影像

圖 17 為使用卡曼濾波器所得之拼嵌影像。此影像所顯示之圖形為港灣壁面的一個孔洞的形狀與大小。圖 16 中所顯示孔洞特徵之不平整已被大幅修正。圖 16-19 所示為估測器向量之數值。圖 18 與 19 為載具之位置估測，而圖 20 與 21 所顯示者為影像位移。圖 21 所示為位置估測誤差共變異隨時間之演變，此圖明白顯示共變異之數值有界且收斂。圖 23 所示之路徑為本次實驗由都卜勒聲納量測值所推算的載具路徑，載具之位置在水平方向稱為 y 方向，在垂直方向定義為 z 方向。

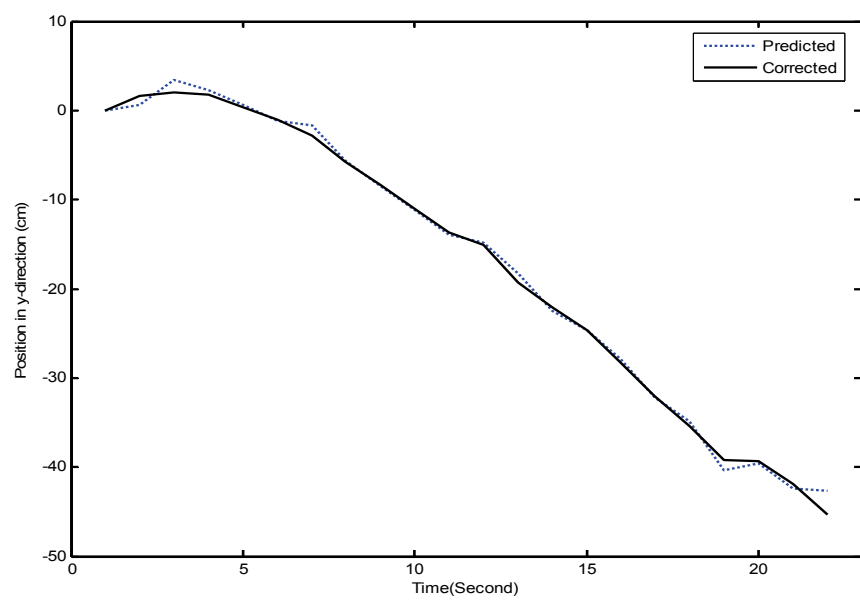


圖 18 y 方向之位置估測

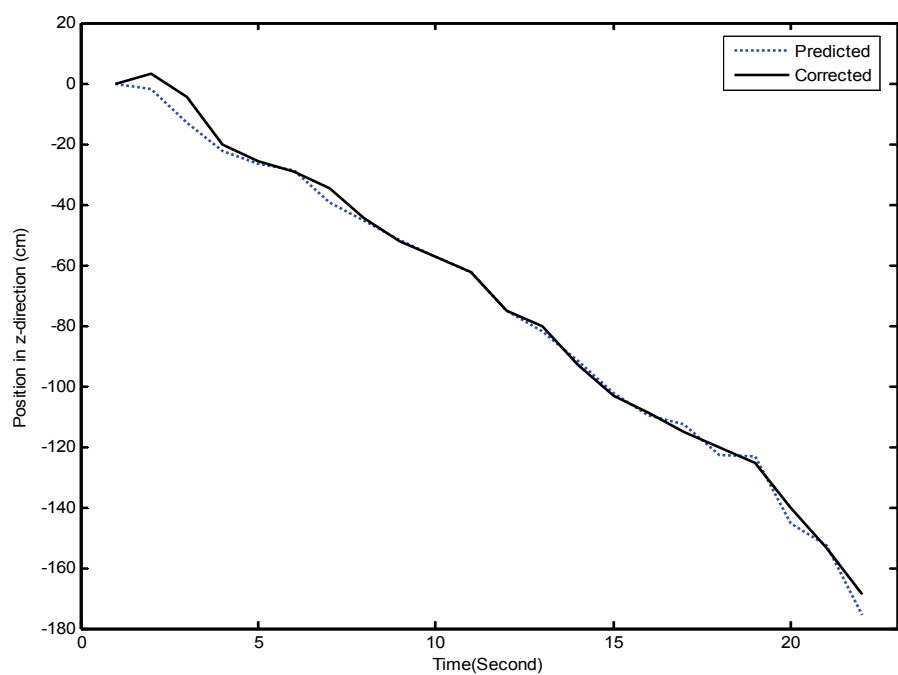


圖 19 z 方向之位置估測

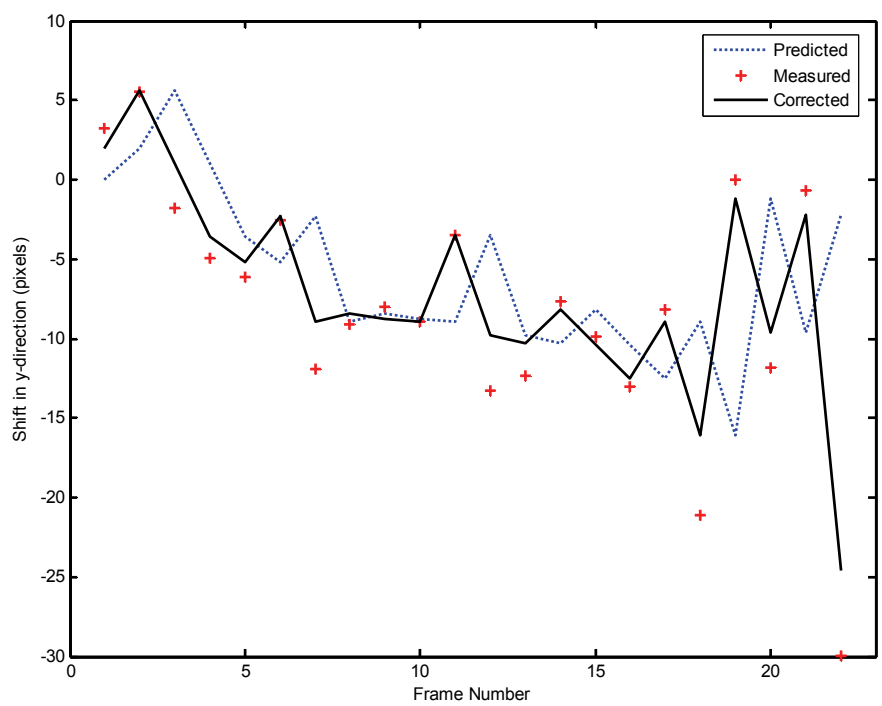


圖 20 y 方向之影像位移估測

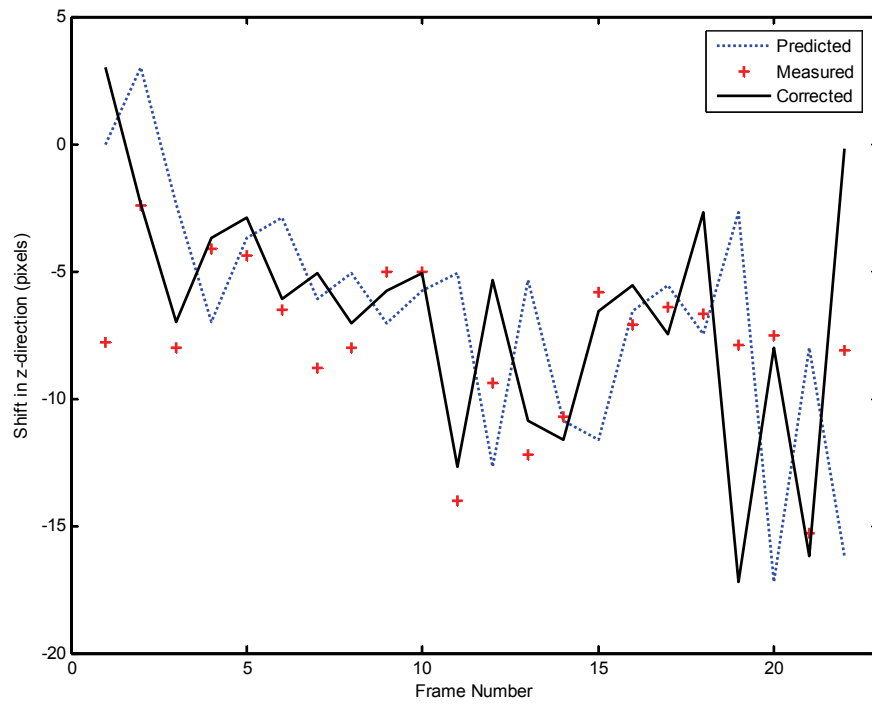


圖 21 z 方向之影像位移估測

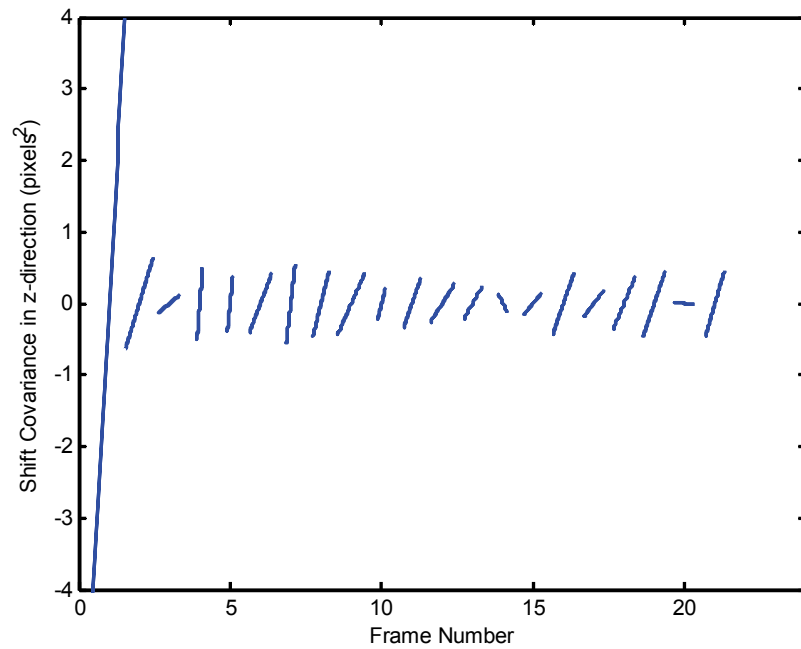


圖 22 共變異矩陣主軸數值隨時間之演變

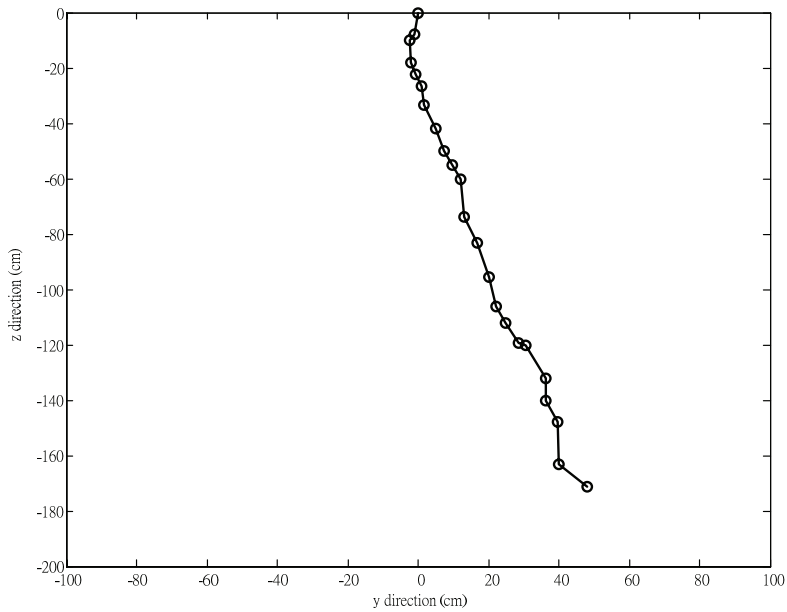


圖 23 都卜勒聲納所推得之載具位置

4.5 前向拼嵌與後向平滑化實驗

本實驗為觀測一長約 4 公尺，直徑 6 公分之水下管線，在觀測時，載具沿管線向前移動，再沿著管線後退，共取得 128 張連續影像。管線之尺寸如圖 24 所標示。圖 25 所示為採用影像間位移為參考之影像拼嵌結果，其中不均勻的管線形狀顯示其位置估測誤差過大。圖 26 至圖 30 所示者，則為加入載具導航數據之位置估測（圖 26, 27）、影像位移估測（圖 28, 29）、以及前向影像之拼嵌成果（圖 30）。所得之拼嵌圖形清楚顯示該管線之重要細節與尺寸，但是在管線之直線外型上，仍有因位置估測誤差所造成的波折現象。

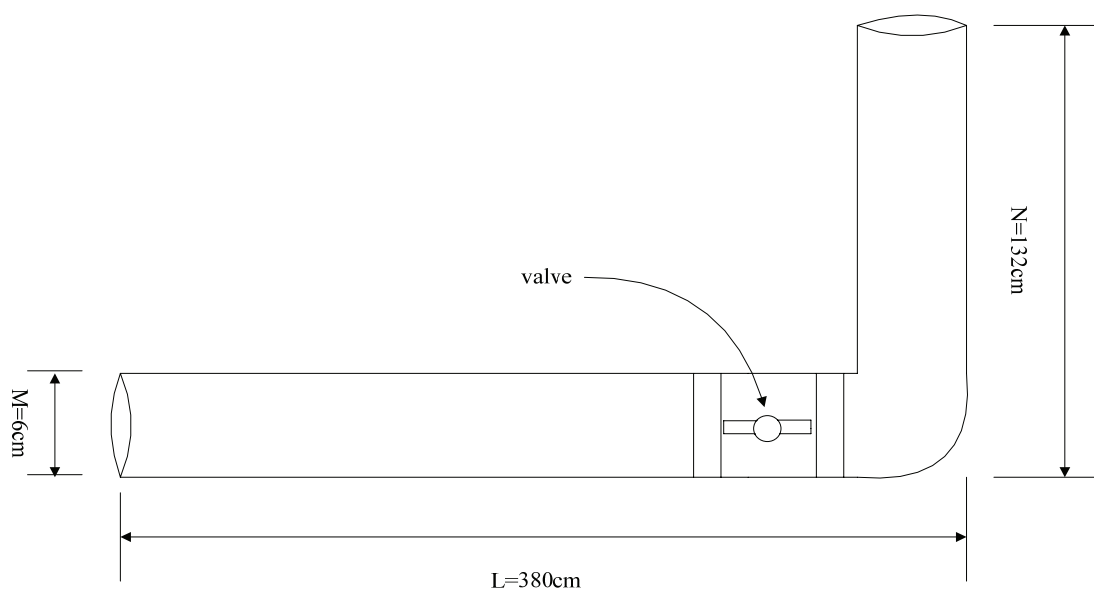


圖 24 觀測對象水下管線之形狀與尺寸

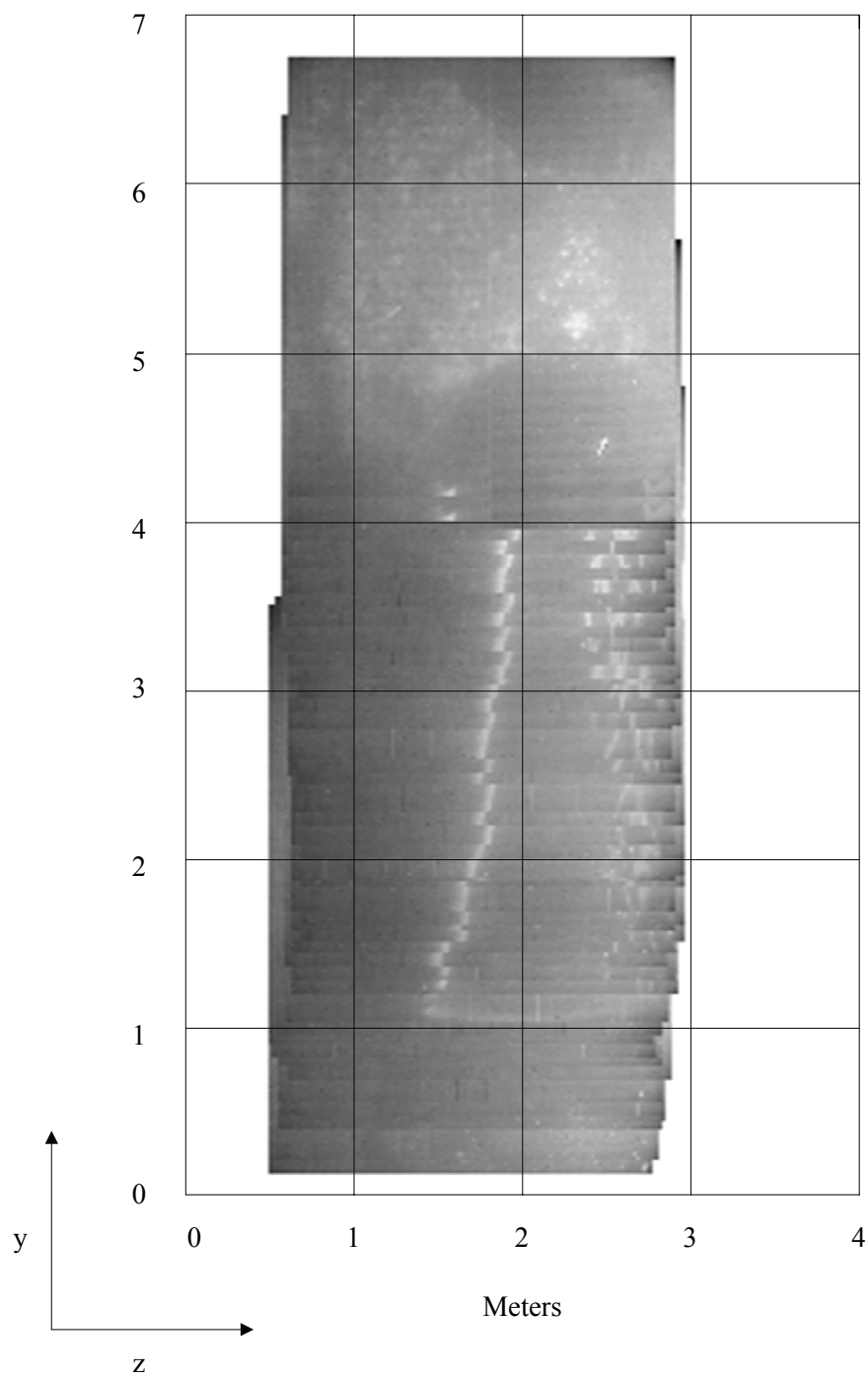


圖 25 使用影像間位移資訊所拼嵌之水下管線影像

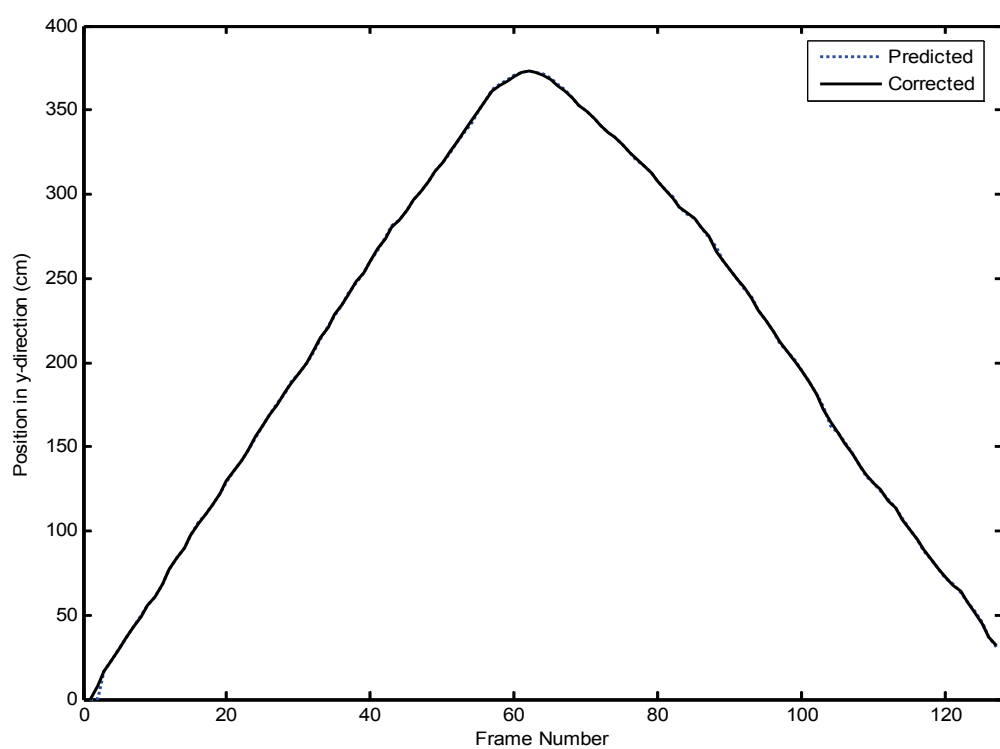


圖 26 y 方向之位置估測

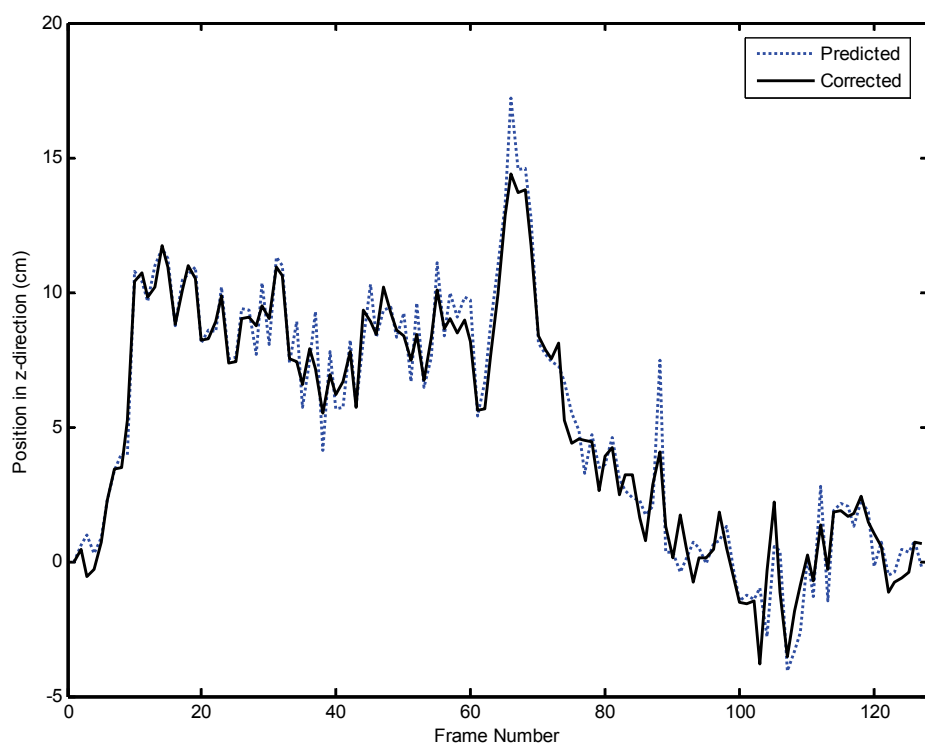


圖 27 z 方向之位置估測

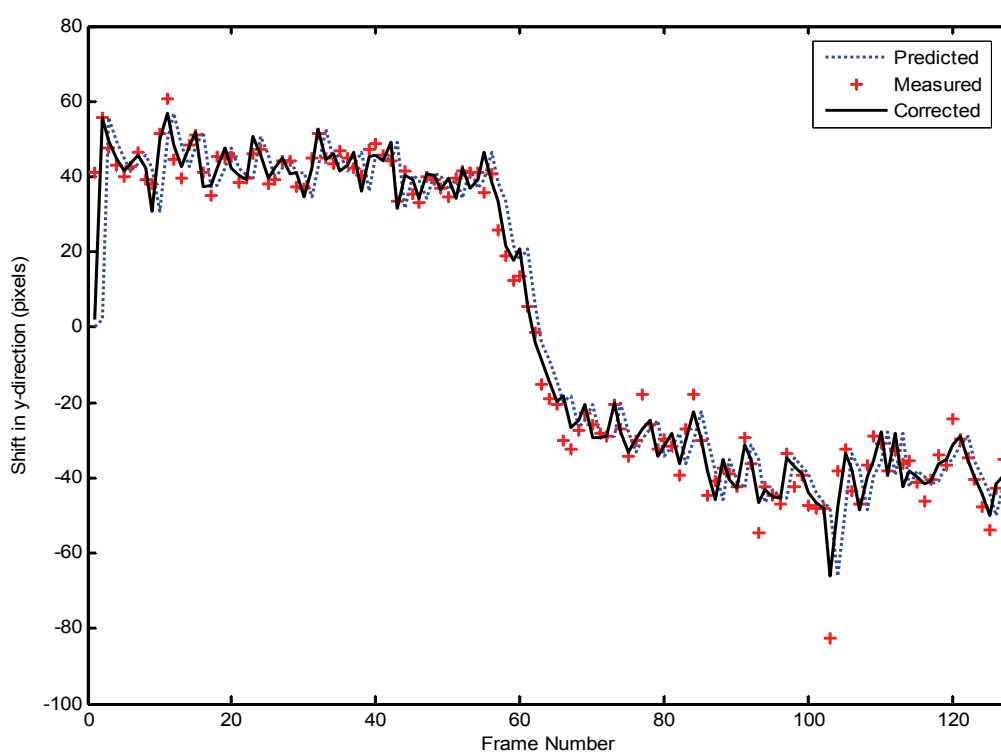


圖 28 y 方向影像位移估測

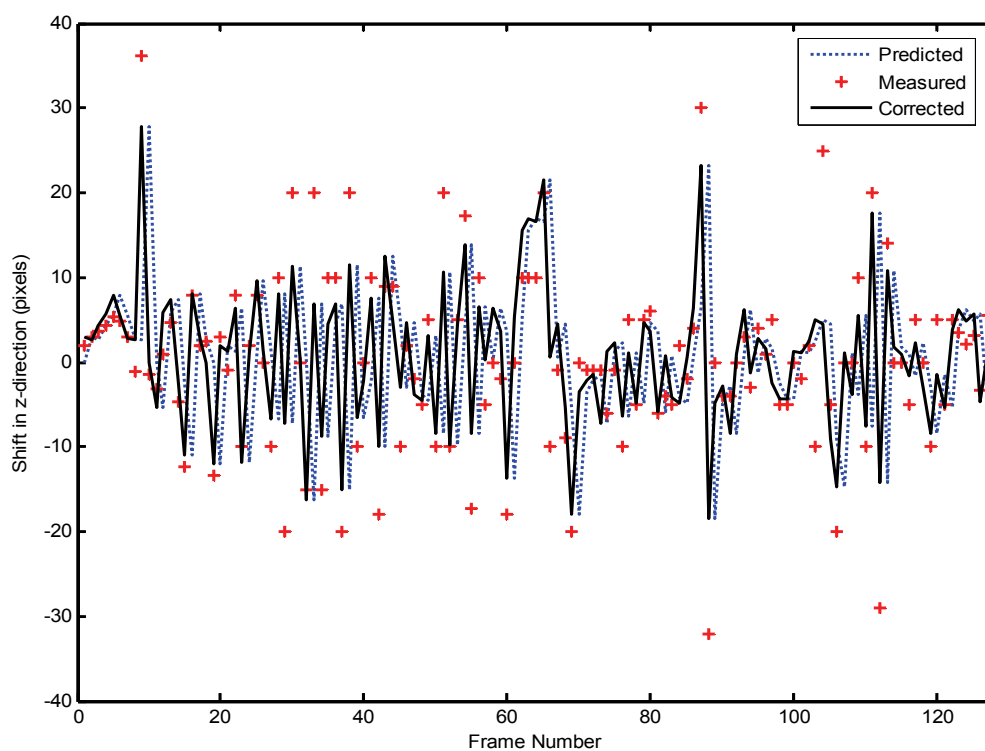


圖 29 z 方向影像位移估測

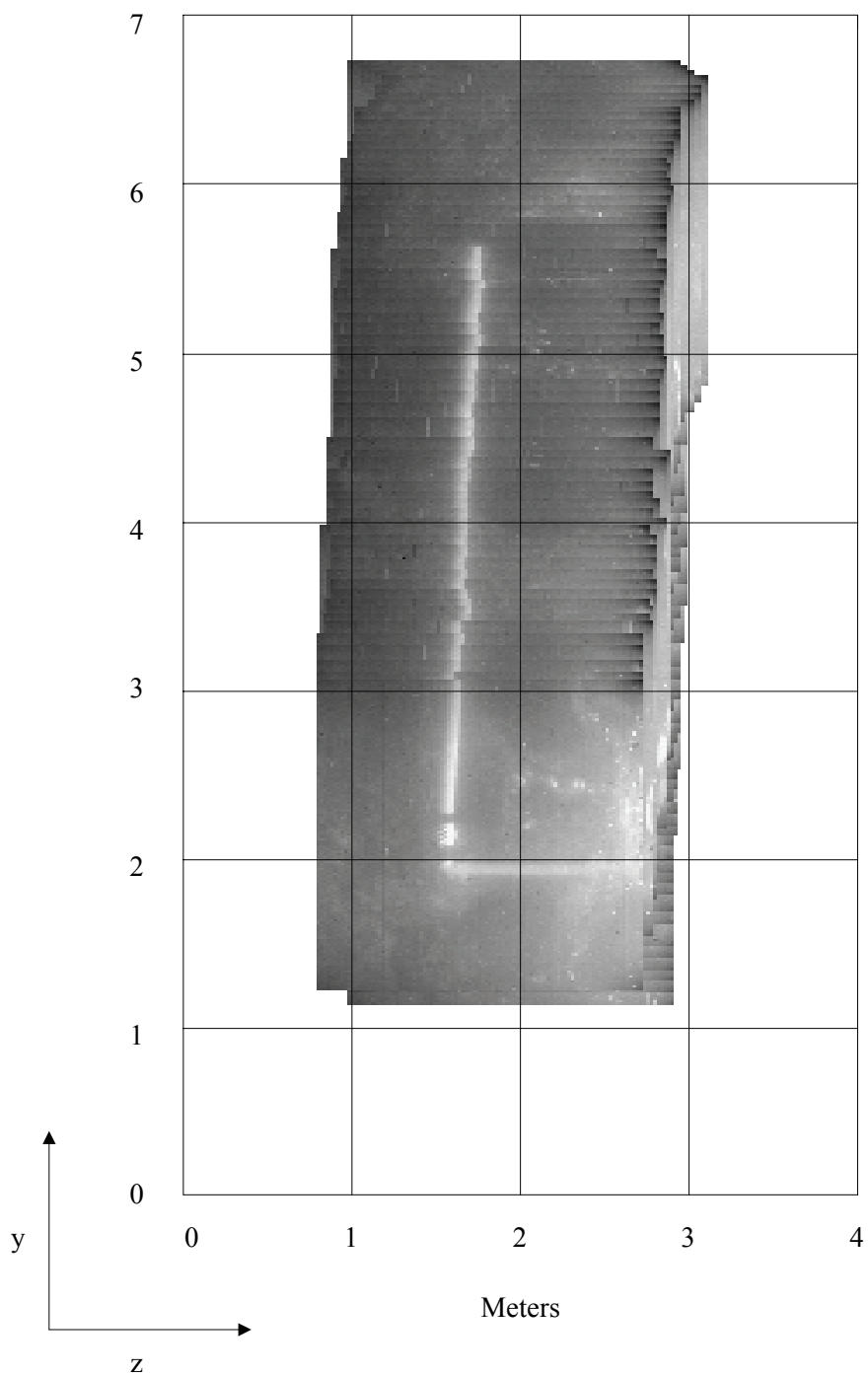


圖 30 前向拼嵌所得之水下管線影像

在圖 30 上，管線長度為 3592 pixels，相當於 360 公分。此圖之管

線長度誤差為 20 公分。在直徑的讀數上，圖形顯示為 63 pixels，或 5.67 公分。在彎折處為 1370 pixels，或 123.3 公分。本實驗所求得之位置估測誤差共變異量如圖 31 所示，圖 32 為都卜勒聲納所推算之載具位置。為了進一步降低拼嵌誤差，當載具沿管線長度後退時擷取之影像可用來將位置估測做平滑化。圖 32 中所標示之數字為相片編號與前向與後向路徑可能交叉的地點。表 4 為交叉檢視所得之結果，由於路徑交叉點發生於載具向後倒退時，因此自第 82 張影像後共偵測到 6 處交叉點，其分別之位置變異量 σ_y 與 σ_z 隨著路徑長度而增加在交叉點檢視過程所使用之 m 皆為 1。

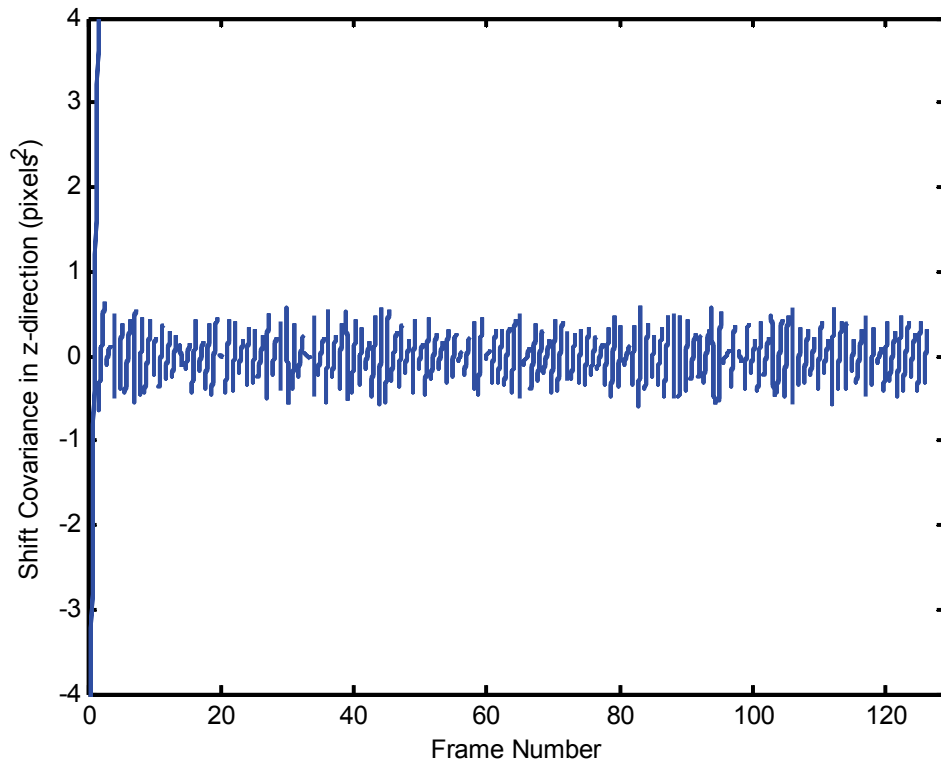


圖 31 位置誤差共變異矩陣之主軸數值

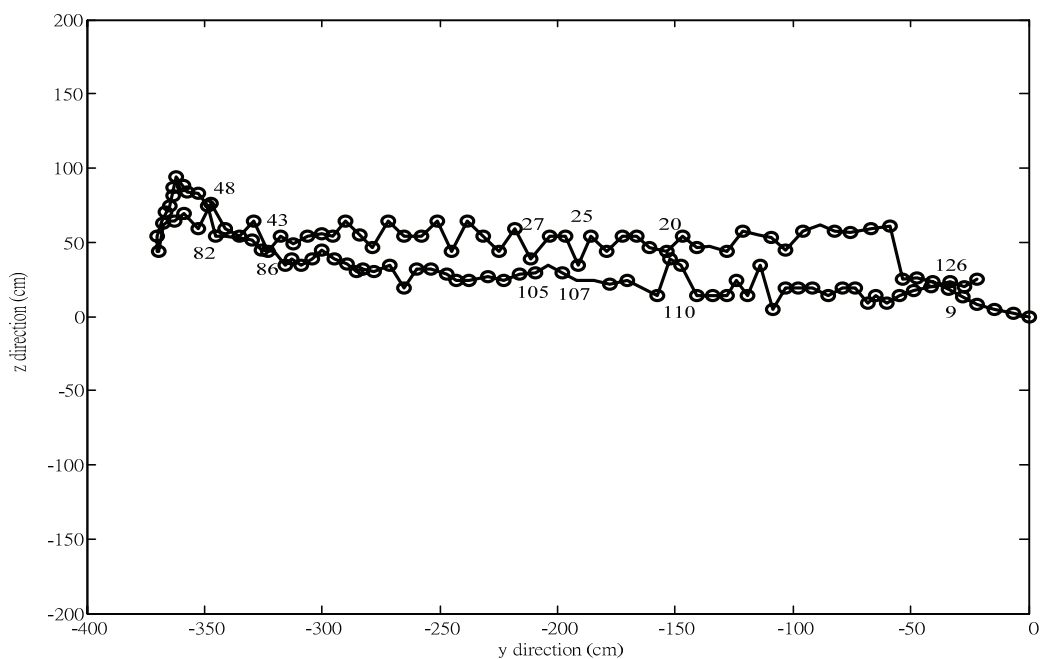


圖 32 都卜勒聲納推算之路徑，在路徑點旁所標示之數字為偵測到的交叉點

表 4 路徑交叉點偵測結果

Frame Number of Crossovers		σ_y	σ_z
126	9	0.2306	0.342
110	20	0.2187	0.3174
107	25	0.202	0.2992
105	27	0.2124	0.3123
86	43	0.1802	0.2869
82	48	0.1624	0.2575

經由後向平滑化處理後之狀態向量隨時間之演變如圖 33 至 36。定義影像位移誤差共變異量之減少百分比為：

$$D = \frac{\text{eig}(\mathbf{P}_k^f)_{(3,3)} - \text{eig}(\mathbf{P}_k)_{(3,3)}}{\text{eig}(\mathbf{P}_k)_{(3,3)}} \times 100\% \quad (55)$$

其中， $\text{eig}(\mathbf{P}_k^f)_{(3,3)}$ 與 $\text{eig}(\mathbf{P}_k)_{(3,3)}$ 為共變異矩陣之第三個固有值，代表 y 方向之影像位移誤差共變異。圖 37 - 48 顯示此六個後向平滑過程中，誤差共變異量的數值變化，以及誤差共變異量之減少百分比。由這些結果可看出，後向平滑化處理可以有效地減少位移估測誤差，共變異量也隨著交叉點之增加而更為降低。

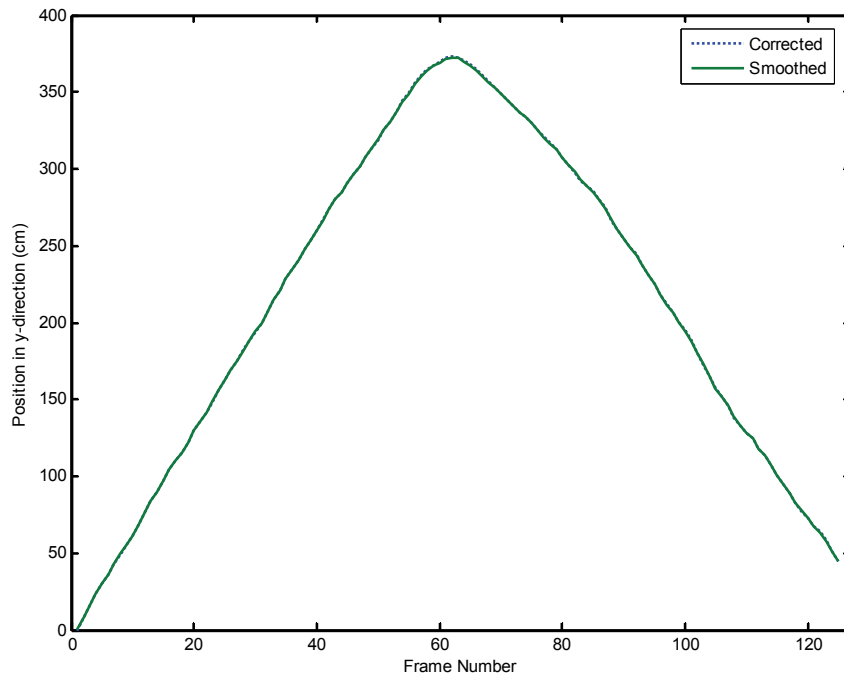


圖 33 平滑化後之 y 方向位置估測

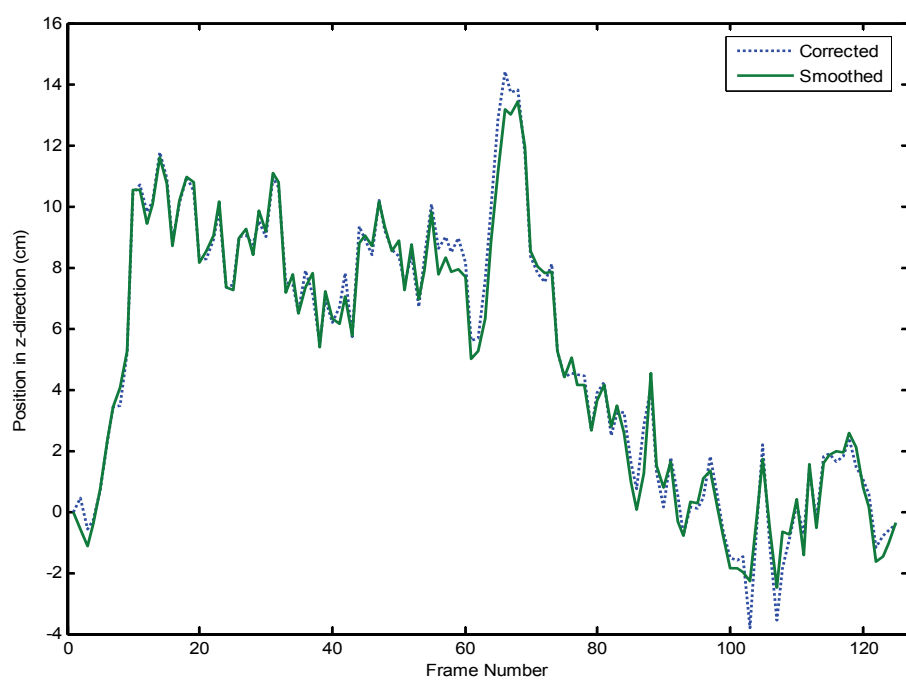


圖 34 平滑化後之 z 方向位置估測

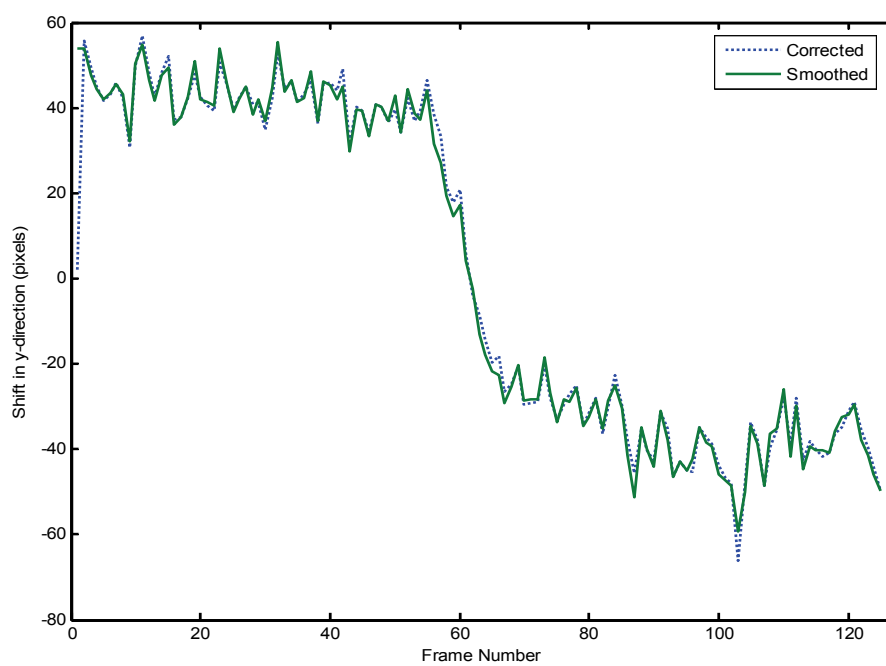


圖 35 平滑化後之 y 方向影像位移估測

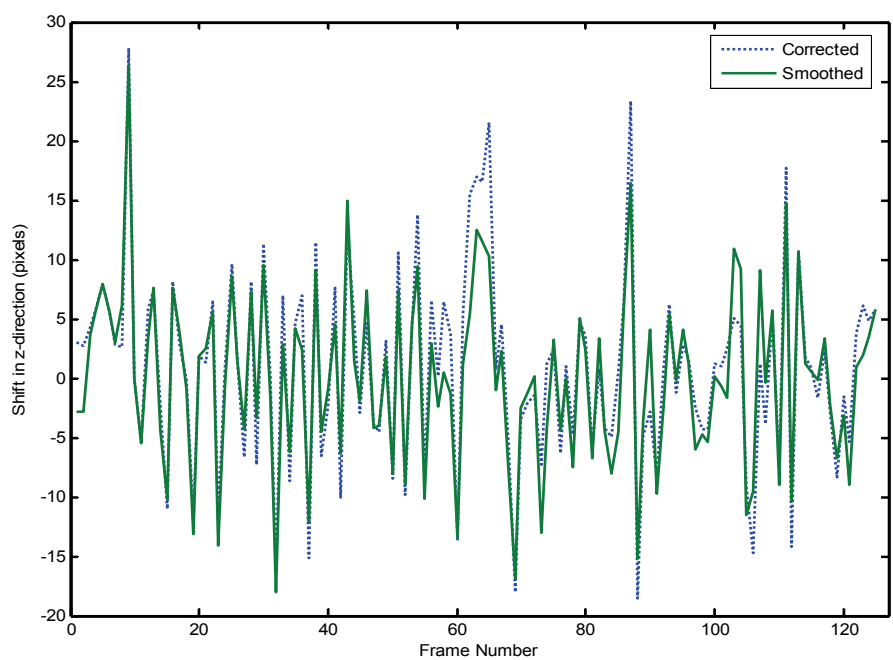


圖 36 平滑化後之 y 方向影像位移估測

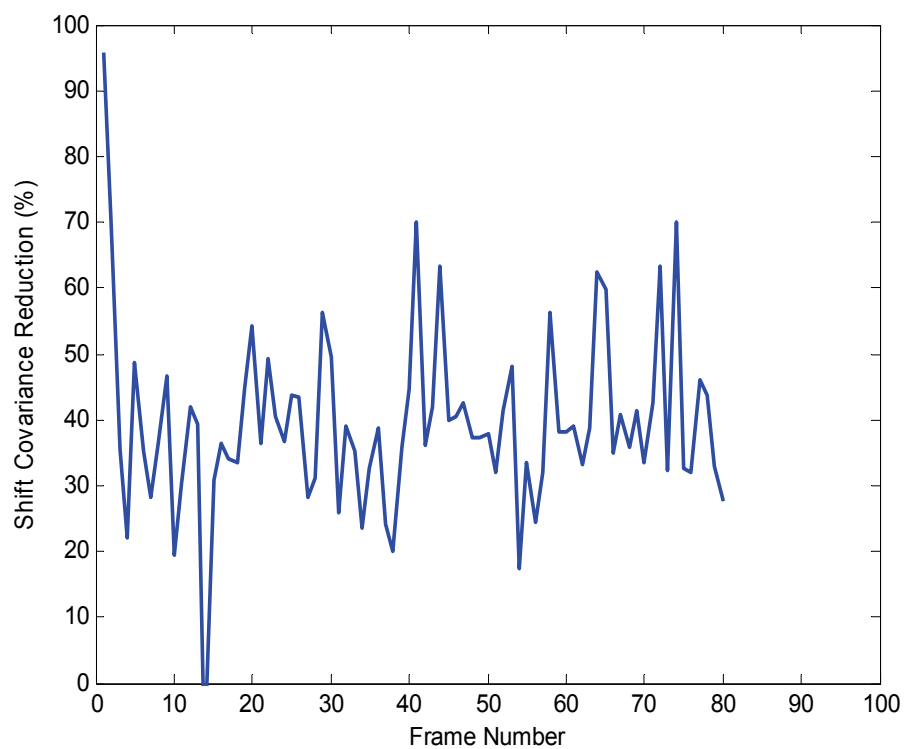


圖 37 第一回平滑化的影像位移共變異減少百分比

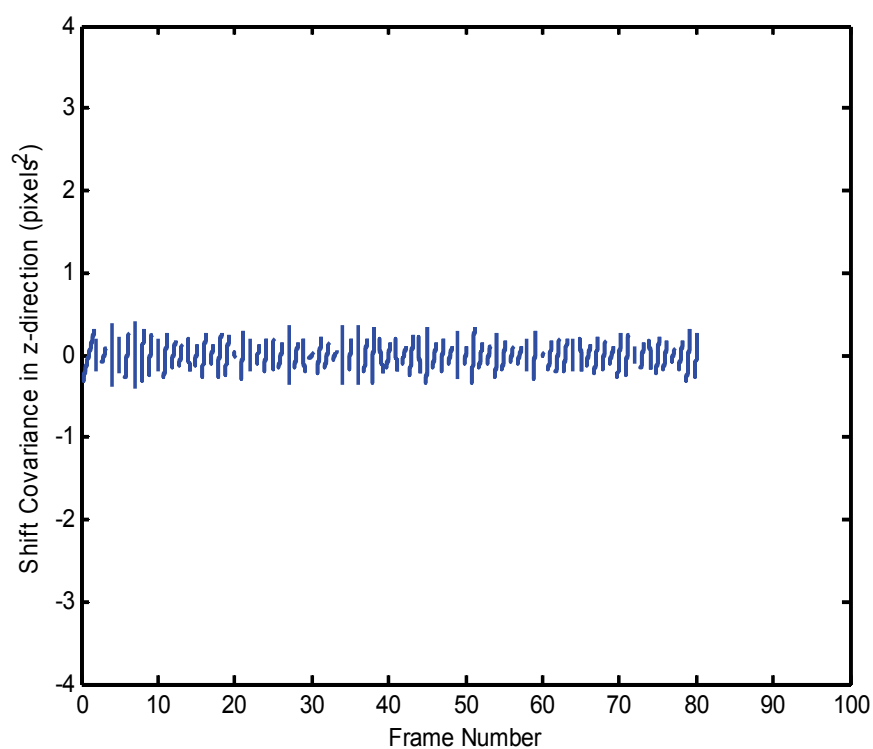


圖 38 第一回平滑化後之位置共變異矩陣之主軸數值

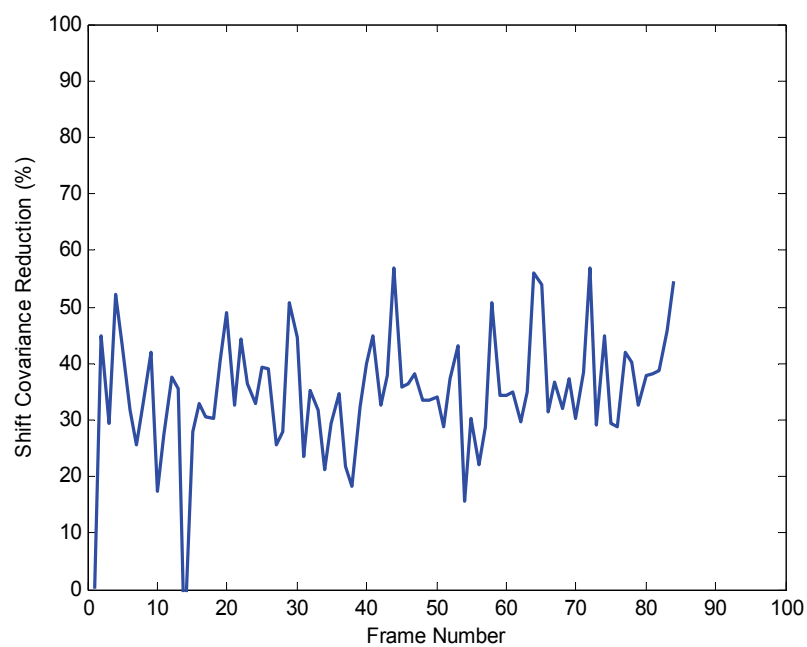


圖 39 第二回平滑化的影像位移共變異減少百分比

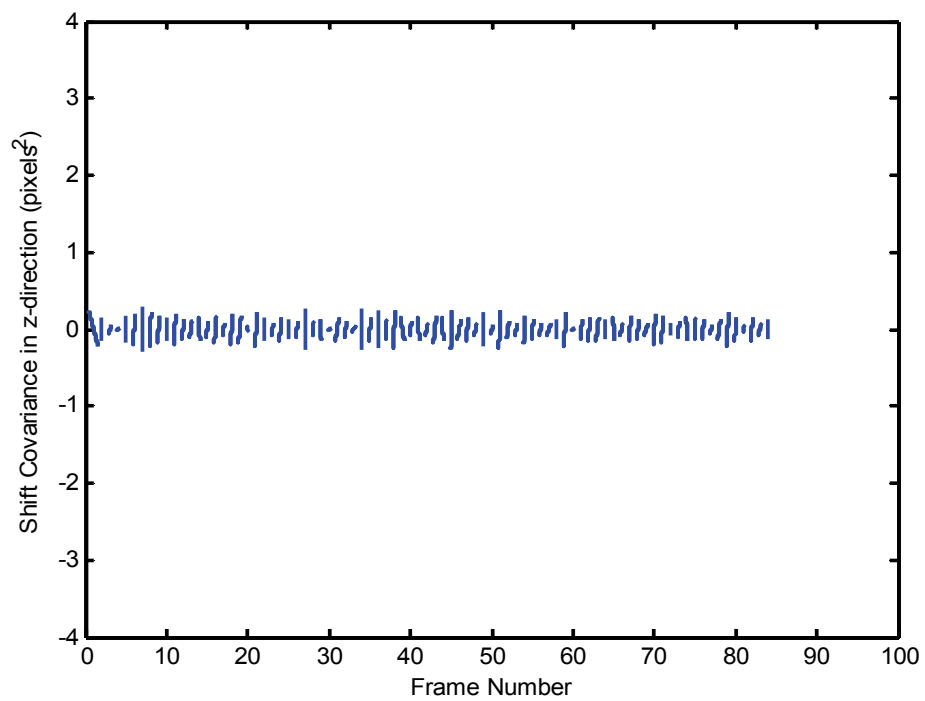


圖 40 第二回平滑化後之位置共變異矩陣之主軸數值

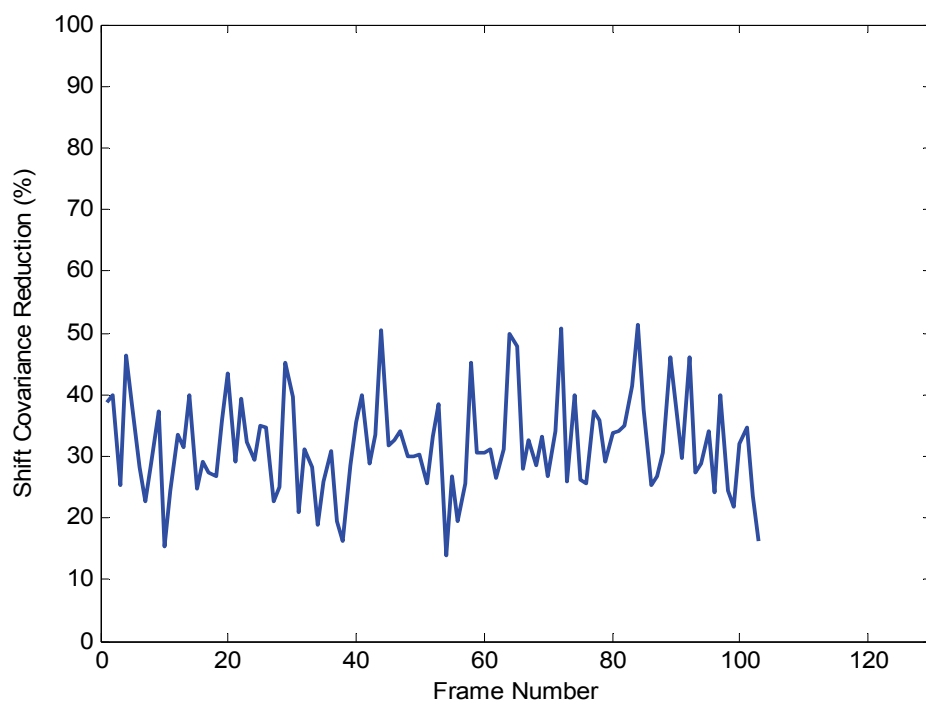


圖 41 第三回平滑化的影像位移共變異減少百分比

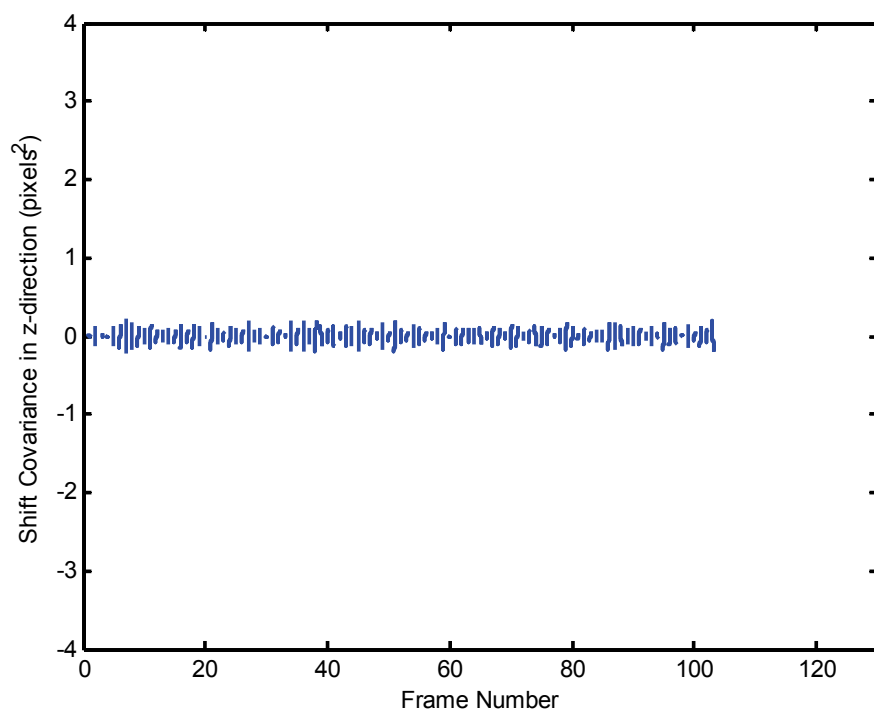


圖 42 第三回平滑化後之位置共變異矩陣之主軸數值

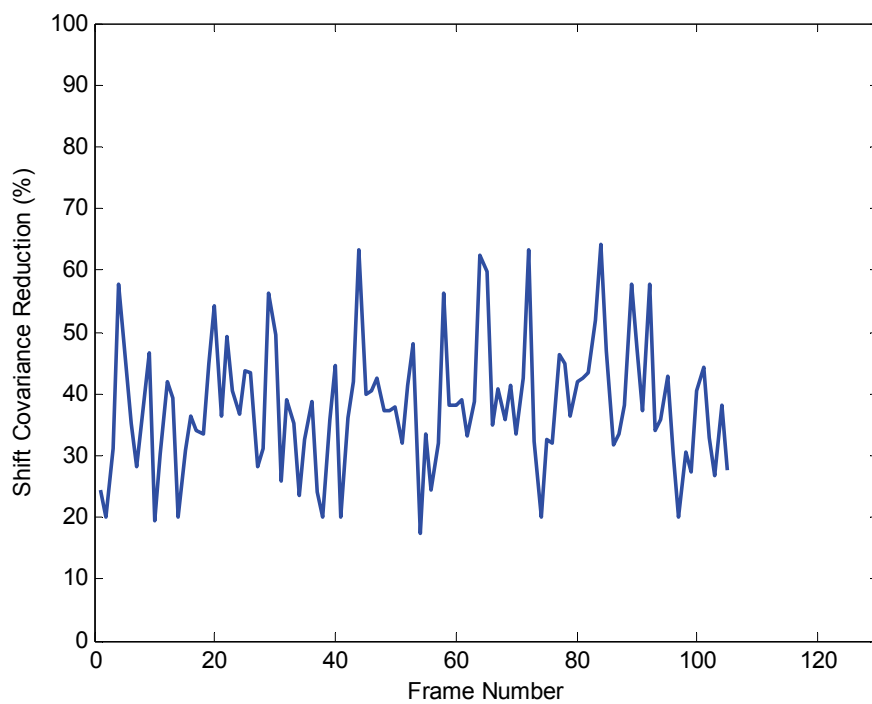


圖 43 第四回平滑化的影像位移共變異減少百分比

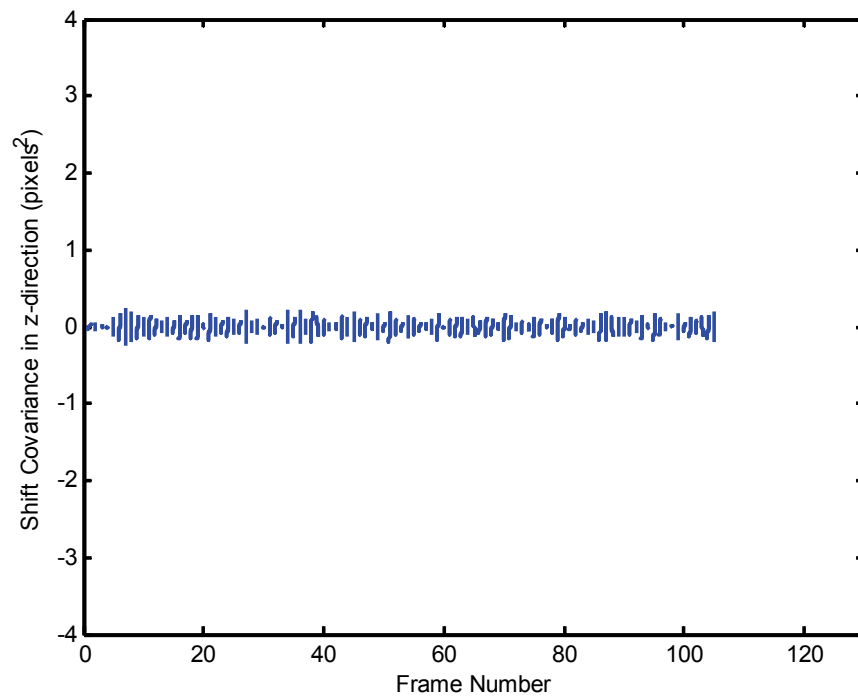


圖 44 第四回平滑化後之位置共變異矩陣之主軸數值

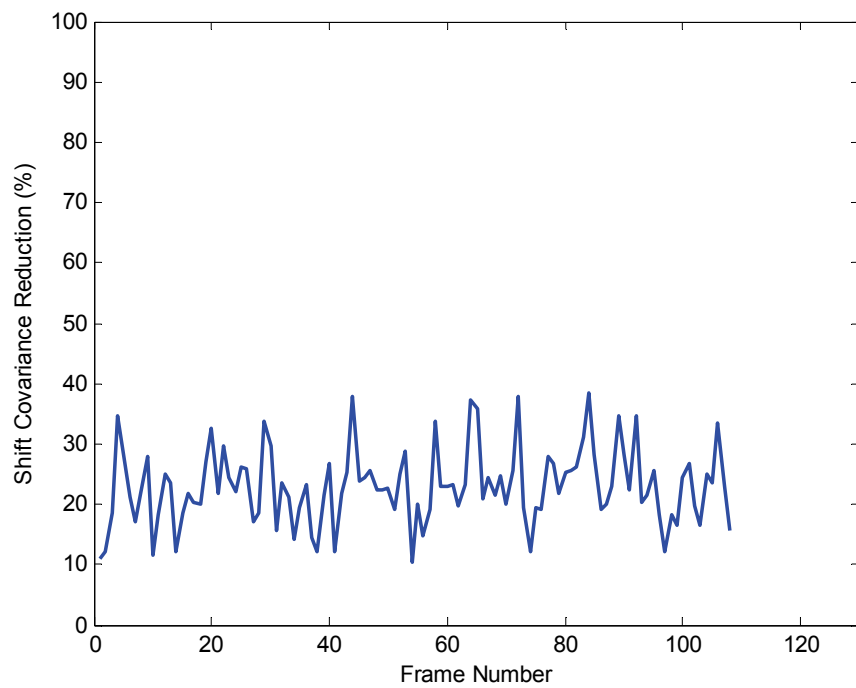


圖 45 第五回平滑化的影像位移共變異減少百分比

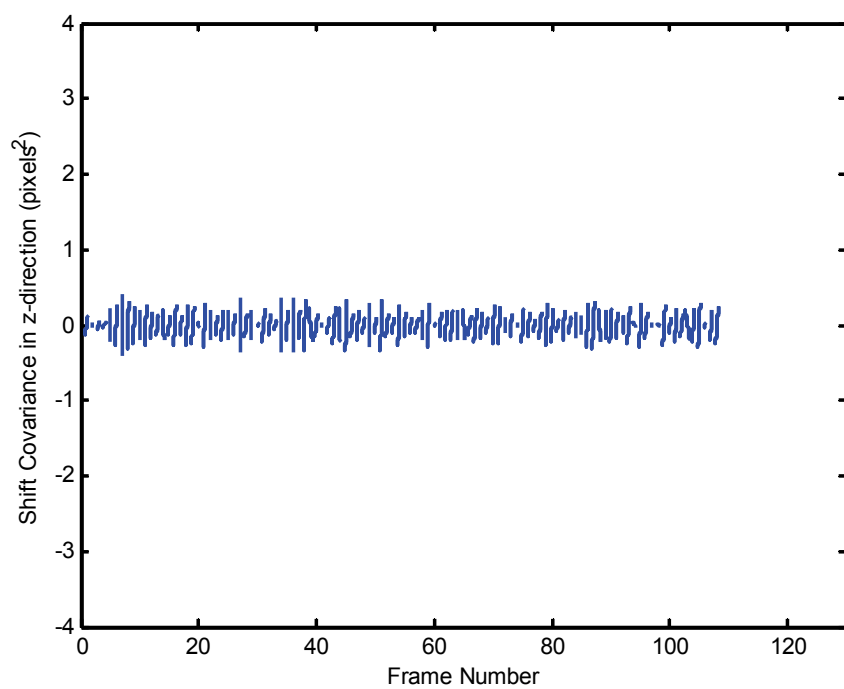


圖 46 第五回平滑化後之位置共變異矩陣之主軸數值

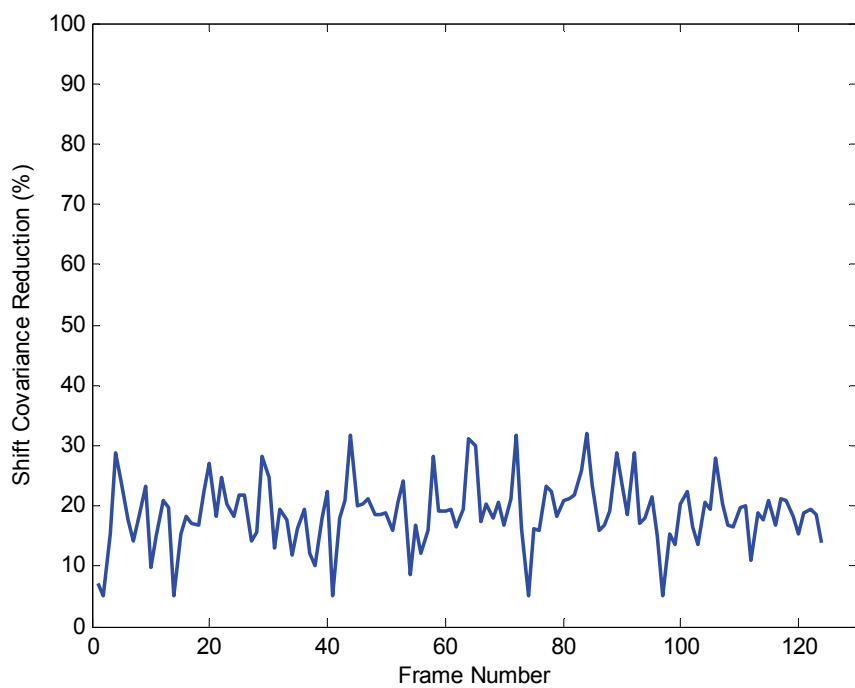


圖 47 第五回平滑化的影像位移共變異減少百分比

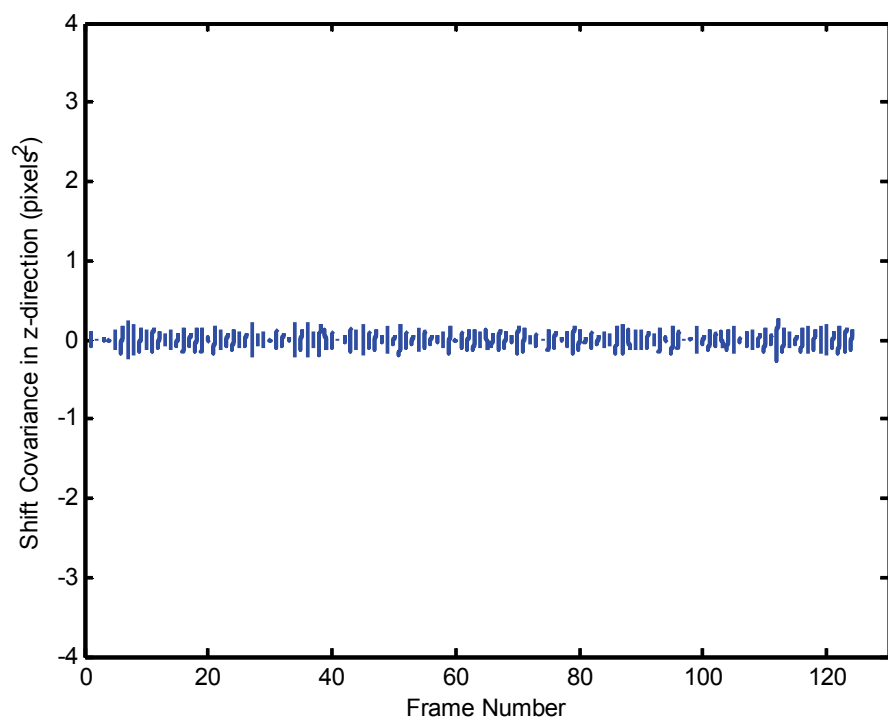


圖 48 第六回平滑化後之位置共變異矩陣之主軸數值

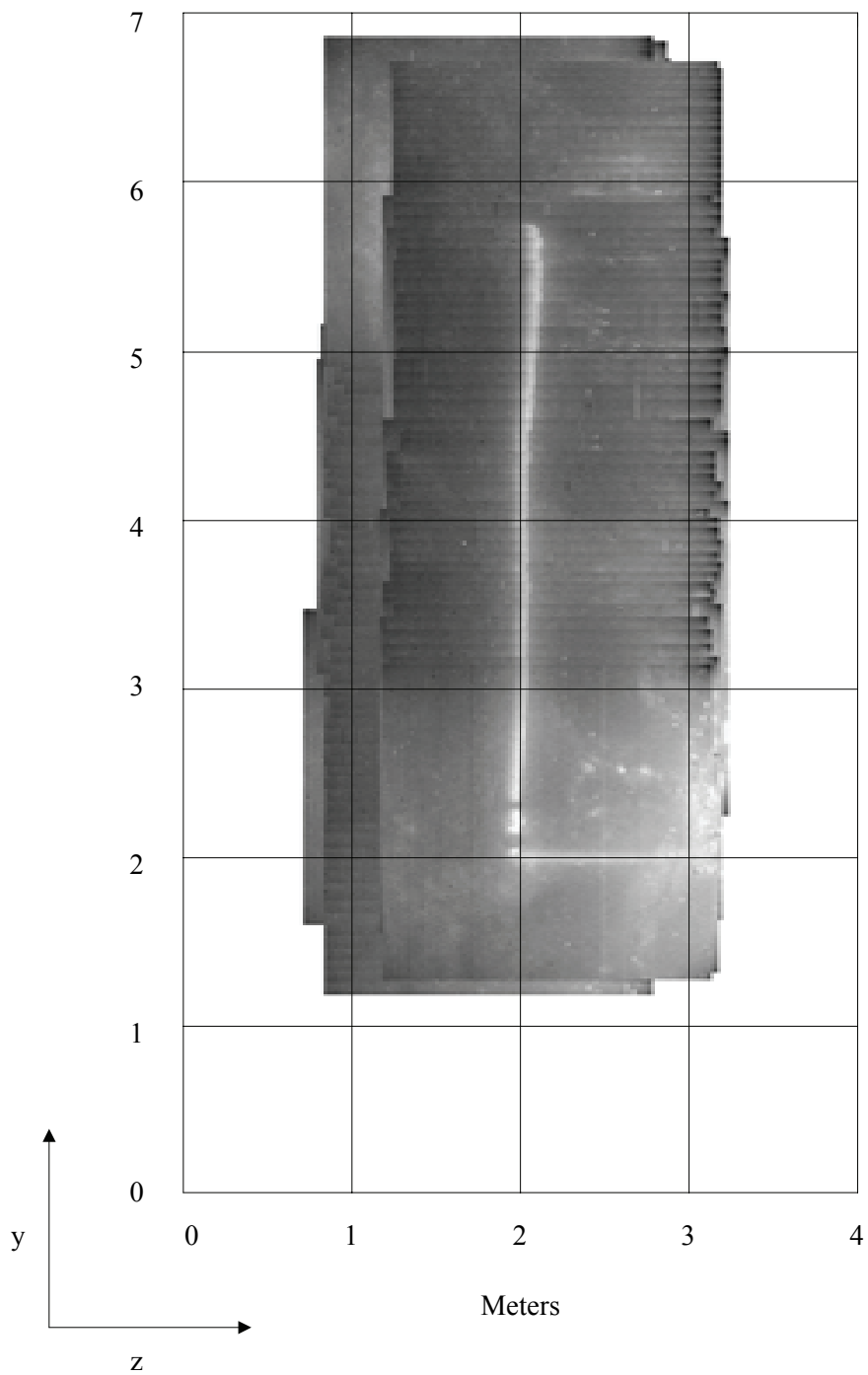


圖 49 經由前向拼嵌與後向平滑化處理後之水下管線拼嵌影像

圖 49 所示為經由前向拼嵌與後向平滑化處理後之水下管線拼嵌影像。此圖中，長度 L 為 3677 pixels，或 366.7 公分，其誤差為 13.3 公

分。直徑 M 為 67 pixels，即 6.03 公分，而 彎折長度 N 為 1392 pixels，或為 125.28 公分，各尺寸之量測值皆得到改善。

第五章 結論與建議

本計畫以水下結構物表面之觀測為目標。由於港灣結構與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港口與防波堤沈箱之水下觀測為主。本計畫以沈箱面觀測之控制導航為主要研究目標：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，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。本計畫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。使用視訊所得之影像數據，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。

5.1 結論

本計畫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、整合測試以及港灣結構物外形追蹤控制、影像擷取與拼嵌等工作。

本年度主要工作是測試載具之控制導航程式與影像拼嵌方法。為了追隨港灣結構物外型，必須即時量測結構物與載具之相對位置，做為追隨的參考路徑。平滑的參考路徑利於載具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，本研究使用 B-spline 擬合，根據載具測距聲納量測到的結構物外型，即時規劃載具之追隨參考路徑。產生參考路徑的演算步驟為：儲存所測得之結構物外形資料、

計算與結構物外形保持等距離的偏移路徑、計算所規劃路徑之曲率、利用 B-spline 方式平滑其路徑、依據設計之導航器及控制器追蹤其參考路徑。測距聲納可量測水下結構物外形與自身位置之誤差量，載具導航系統則可以提供載具在大地座標的位置估計值，本研究根據這些量測與估計數據，提出載具路徑追蹤控制系統的數學模式，並建立結構物與載具相對距離、控制系統增益數值與路徑追蹤系統響應之關係，並藉由路徑追蹤控制系統之暫態響應規格，來獲得合理的測距聲納裝設位置。除了路徑追蹤控制器，本報告亦介紹載具運動控制器之設計方法，載具運動控制器採用比例微分型，藉由系統的穩定性分析找出預測距離的準則。最後，針對所提出之路徑規劃、路徑追蹤與運動控制系統之全系統架構，本研究利用載具數學模型來進行模擬與海域實驗，由結果得知此架構之性能表現可實際應用於無人水下載具水下結構物觀測之作業。

使用水下無人載具進行結構物表面攝影記錄工作，常因水中能見度低而必須貼近結構物表面拍攝。局部的影像紀錄必須經由影像鑲嵌技術去拼排成大範圍影像，以做為維修及檢測之根據。影像鑲嵌過程由於亮度不均、影像變形、信號雜訊等因素，產生鑲嵌誤差而次誤差隨著時間累積會造成誤差值的發散，使得所鑲嵌之影像無法被使用。本計畫針對水下影像鑲嵌技術所遭遇的困難，利用多感測器訊號融合與重複的測量，來解決誤差累積與減少影像誤差對鑲嵌結果所造成的影響。本計畫使用水下無人載具上所裝配之光學攝影機，在載具移動時拍攝影像，利用相鄰影像重疊部分估測載具之位移，來達到自動鑲嵌。本研究採用杜卜勒速度聲納估載具的位置，將此位置資訊與影像估測位移整合，並藉由偵測載具路徑交叉位置之誤差資訊，使用卡曼濾波器之逆向平滑處理，重新排列位置的誤差。本報告所提出之方法經由實驗驗證，具有改善整體鑲嵌影像的效果，可以提供未來水下無人載具觀測結構物、海底表面等作業之參考。

5.2 建議

本計畫是以自主式水下觀測載具系統來達成水下結構物觀測的自動化。此系統最大的特點是結合影像處理與載具之控制程式，依照結構物外形，以自動導航的方法來觀測記錄海洋結構物外形影像資料。

自主式水下觀測載具系統是近二十年來逐漸普遍的海下探測工具。由於自主式水下觀測載具系統是屬高科技的水下精密觀測儀具，在未來的系統的研發與操作維護方面，需要投入長期固定的人力及相關支援設備，如維修工具、備料、發電機、吊具等。本計畫已累積水下無人載具的自主發展能力，並已建立世界上具有特色的港灣觀測載具系統。為求系統的性能穩定、體積小型化，建議未來藉由研發計畫，更進一步建立水下載具追蹤不規則結構物外形的方法、嵌入式平台硬軟體及操作介面開發、系統整合、電源管理、智慧型推進系統設計、外觀設計與流體特性分析、資料處理與分析、高速影像辨識系統、高畫質影像處理系統、無線影像傳輸系統開發等。這些新的技術的建置，除了可以進一步提昇本載具系統的實用性，對於世界上之水下觀測用無人載具科技之建立也將有莫大的助益。

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 Properties 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。
9. 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(3/4)」，交通部運輸研究所報告，中華民國 96 年 10 月。

10. R. D. Ballard, "The MEDEA/JASON Remotely Operated Vehicle System," *Deep-Sea Res.*, vol. 40-8, pp. 1673–1687, 1993.
11. T. C. Dawe, D. S. Stakes, P. R. McGill, J. Barry, and S. Etchemendy, "Subsea Instrument Deployments: Methodology and Techniques Using a Work Class Remotely Operated Vehicle (ROV)," *Proc. Oceans'98*, vol. 3, pp. 1589–1593, Nice, France, 1998.
12. J. P. Comstock, (ed.), *Principles of Naval Architecture*, Chapter VIII, Society of Naval Architecture And Ocean Engineering, New York , 1967.
13. J. Kim, J. Han, W. K. Chung, J. Yuh and P.-M. Lee, "Accurate and Practical Thruster Modeling for Underwater Vehicles," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 2005
14. G. Indiveri, *Modelling and Identification of Underwater Robotic Systems*, Ph.D. Dissertation, DIST Univ. of Genova, Italy, 1998.
15. Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, T. Noguchi, "A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot," *IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, OH, U.S.A., Vol. 1, pp. 384-389 1990.
16. F. A. Papoulias, "On the Nonlinear Dynamics of Pursuit Guidance for Marine Vehicles," *Journal of Ship Research*, Vol. 37, No. 4, pp. 342-353, Dec. 1993.
17. F. A. Papoulias, "Stability Considerations of Guidance and Control Laws for Autonomous Underwater Vehicle in Horizontal Plane," *Proceedings 7th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, Durham, N.H., 1991.
18. Pedro Gomes, Carlos Silvestre, Antonio Pascoal, Rita Cunha, "A Coastline Following Preview Controller for the DELFIMx Vehicle," *Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Lisbon, Portugal, July 1-6, 2007.

- 19.施詮熙，陳冠宇，郭振華，邱永芳，蔡金吉，“無人載具追隨水下結構物外形之路徑規劃方法兩控制器設計”，第 10 屆水下技術研討會，中山大學，2008。
- 20.邱永芳，郭振華，邱逢琛，蔡金吉，何良勝，“無人水下載具結構改良”，中華民國專利，新型第 M348742 號，2009。
- 21.邱永芳，郭振華，邱逢琛，蔡金吉，何良勝，“具側掃聲納導航及目標物辨識功能之無人水下載具”，中華民國專利，新型第 M348743 號，2009。

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-97-H2DB009

計畫名稱：水下結構物自動檢測系統研究(4/4)

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、本計畫以水下結構物表面之觀測為目標，已完成UUV之各部分設計與整合，本期著重於導航與控制器之設計，並以蘇澳港防波堤沉箱之實測，完成一些初步觀測性任務，值得肯定。	一、感謝委員的評論。	一、符合。
二、導航與控制器之設計推導其曲線路徑的穩定分析，並運用B-Spline曲線參數方向的微分方程式作為曲率參考。	二、感謝委員的評論。	二、符合。
三、建議增列實驗數據，例如圖 11、12 等，可成為實驗專章。	三、期末報告將專列實驗數據之說明。	三、依處理情形辦理。
四、建議增列後半期預定工作。	四、已更正。	四、依處理情形辦理。
五、圖八之指標誤打，請更正。	五、已更正。	五、依處理情形辦理。
六、英文摘要請重作 Spelling Check，利用最小平方法找‘模式’參數值(在中文摘要未見)請更正。	六、已更正。	六、依處理情形辦理。
七、未來報告建議列入符號表、術語對照表。	七、期末報告中遵照辦理。	七、依處理情形辦理。
蔡清標 教授		

一、本計畫發展無人水下載具以進行水下結構物之自動檢測，本年度為第四年之研究，擬進行現場測試作業，符合期中進度。 二、擬進行那些港灣防波堤之測試，請補充說明本研究目前規畫情形。是否包括防波堤沉箱消波塊斷面外形之規畫？ 三、本無人水下載具系統，是否可能受水質或不規則消波塊或拋石之影響，並請說明本載具之Resolution、應用條件及限制。 四、研究報告中內文及方程式之字型，建請放大，以利閱讀。 五、本計畫是否包括與港研中心之技術轉移部份？ 六、影像結果，建議能標示Scale。	一、感謝委員的評論。 二、本研究目前正進行載具在港內之沈箱碼頭壁面攝影鑲嵌技術發展。未來預期挑選北部及中部各一個港口進行防波堤沈箱表面觀測實驗。消波塊斷面之描繪則在側掃聲納與載具之整合確認之後開始測試。 三、本載具若根據岸壁外形之量測數據而規劃運動時，會受到不規則消波塊或拋石之影響，而產生不規則的運動。水質過度混濁時，將影響光學攝影影像之清晰。若在港口水下環境，需要將攝影機置於與結構物 30-50 公分距離內，因此所拍攝的影像限於結構物之局部，並會受到鏡頭曲率影響而變形，需要以信號處理技術來修正誤差。 四、遵照辦理。 五、本計畫部分成果正在與港研中心共同申請專利。 六、遵照辦理。	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。 五、依處理情形辦理。 六、依處理情形辦理。
王兆璋 副教授 一、本計畫為四年期執行時程的最後一年，成果展現上為現場測量攝影結果為主，或許目前僅為期中報	一、關於現場攝影量測成果部分將於期末報告中做詳細說明。	一、依處理情形辦理。

告，有些具體現場實驗或測量攝影結果尚未準備、整理完備，故在本報告中無法看到該部分的成效，希望在期末報告時，能有比較完整詳盡的敘述。 二、雖然目前尚未看到具體攝影後水下沉箱狀況，但依中心所揭槩的目標必須在資料後呈現水下結構的全貌，在本報告中並未解釋或談到這個議題，可否請主持人大致說一下這個部分。	二、使用水下無人載具進行結構物表面攝影記錄工作，常因水中能見度低而必須貼近結構物表面拍攝。局部的影像紀錄必須經由影像鑲嵌技術去拼排成大範圍影像，以做為維修及檢測之根據。影像鑲嵌過程由於亮度不均、影像變形、信號雜訊等因素，產生鑲嵌誤差而次誤差隨著時間累積會造成誤差值的發散，使得所鑲嵌之影像無法被使用。本研究是針對水下影像鑲嵌技術所遭遇的困難，利用多感測器訊號融合與重複的測量，來解決誤差累積與減少影像誤差對鑲嵌結果所造成的影響。本研究使用水下無人載具上所裝配之光學攝影機，在載具移動時拍攝影像，利用相鄰影像重疊部分估測載具之位移，來達到自動鑲嵌。在影像逐一比對的過程中，先將影像轉換成頻域影像，此方法可將影像轉變成週期函數，使影像計算量降低。再者，為了減少影像誤差之影響，本研究採用杜卜勒速度聲納估載具的位置，將此位置資訊與影像估測位移整	二、依處理情形辦理。
---	--	-------------------

	合，並藉由偵測載具路徑交叉位置之誤差資訊，使用卡曼濾波器之逆向平滑處理，重新排列位置的誤差。本方法經由實驗驗證，具有改善整體鑲嵌影像的效果，可以提供水下無人載具觀測結構物、海底表面等作業之影像鑲嵌圖像。	
曾相茂 研究員 一、第 19 頁圖 8 之縱軸及橫軸請標示說明且內圖請標示其數值之單位。 二、第 22 頁圖 8 是否應改為圖 9。 三、期中報告已符合進度且結果是被肯定的。	一、已修改。 二、已修改。 三、謝謝委員的評論。	一、依處理情形辦理。 二、依處理情形辦理。 三、符合。

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-97-H2DB009

計畫名稱：水下結構物自動檢測系統研究(4/4)

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、本計畫已完成UUV部分之整合設計，並由影像拼嵌，採用都卜勒速度聲納估測載具位置，經由卡曼濾波器之方法，應用各種實驗驗證，改善影像拼嵌效果，值得肯定。 二、建議報告中加入符號表、術語對照表及關鍵字。 三、文中圖面部分標記請重新檢視。 四、P25.之圖11、12以研究路徑之規劃方法及港灣實測部分是否誤打圖號(漏列圖13)，另在影像拼嵌專章是否可補充此部分。 五、P8.圖2 signal誤打及Title，請更正。 六、可多提供一些照片或實驗實證。	一、感謝委員的評論。 二、感謝委員的評論。 三、以重新檢視更正。 四、已更正。 五、已更正。 六、遵照辦理。	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。 五、依處理情形辦理。 六、依處理情形辦理。
蔡清標 教授 一、建議增加圖表目錄。 二、第四章目錄之頁碼有誤，請更正。	一、遵照辦理。 二、已更正。	一、依處理情形辦理。 二、依處理情形辦理。

三、第三章建議增加 3.5 實例與討論，並敘明港灣結構物之地點及名稱。 四、第四章建議增加實例與討論。 五、第五章結語，建議分成 5.1 結論與 5.2 建議。 六、本研究在載具系統及影像拼嵌上，已驗證其可行性。惟本年度主要成果應包括蒐集港灣結構物水下觀測數據，但期末報告似尚無具體之觀測數據或特性之說明。 七、圖 8 中線條形式說明有誤，請更正。 八、期中報告審查意見處理情形，建議納入討論或建議中。許多期末簡報之內容，應考慮納入報告中。 九、報告中圖片部分建議增加清晰度。	三、遵照辦理。 四、已增列實例與討論。 五、遵照辦理。 六、報告所列之基隆港水下影像數據為本研究之觀測數據。與影像有關之影像特徵、特徵之大小尺寸等即為本研究觀測所得之主要數據。 七、已更正。 八、遵照辦理。 九、已替換較清晰圖像。由於水中影像在取像時受限於光源不足且不均勻，其清晰程度不足，因此造成影像拼嵌的困難度，也是本研究之研究重點之一。	三、依處理情形辦理。 四、依處理情形辦理。 五、依處理情形辦理。 六、依處理情形辦理。 七、依處理情形辦理。 八、依處理情形辦理。 九、依處理情形辦理。
翁文凱 教授 一、路徑自動規劃系統，如遇不連續面，如沈箱破損所形成之破洞，是否會造成無法自動規畫路徑。	一、路徑規劃所根據之資訊為結構物表面形狀之量測數據，因此若有多破損所形成之孔洞，會造成路徑量測值的大幅度變動。本計畫所研發之路徑產生程式會自動消去大幅變動的數值，平滑化所產生的路徑。若孔洞很大，形成大幅的結構物表面凹陷，則載具將追隨此凹陷的表面前進。	一、依處理情形辦理。

二、影機可拍攝距離若在 30~50cm 內，在水下環境較為複雜，如流及海浪作用，或較為不規則地物(如塊時消波塊)，是否可能造成碰撞，建議能制定本系統所能適用之環境範圍與條件。 三、攝影系統是否包含探照光源。 四、以本系統而言，若以之檢測海底管線，其動力是否能抵擋海流之強度？ 五、以目前情況而言，大致完成成本計畫目標。 六、影像之拼嵌是否會因艇速及流速與艇之動態而影響，若有則其影響程度為何？	二、本計畫所發展之載具具有靜水中 4 節的前進速度，在對向水流時可以在水流中保持自動定位的能力。但在水面浪中，其反應時間需是波浪外力之週期而定。 三、攝影機有包含照明的機具。 四、載具可抗對向 4 節之水流。 五、謝謝審查委員。 七、拼嵌之過程皆有儲存載具動態資料，因此影像之相互定位在考慮載具動態資料後，可以還原補償載具運動所造成之移動量。	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、符合。 六、依處理情形辦理。
黃明志 教授 一、圖 1.1 在報告中未說明。 二、圖 1.1、圖 1.2 接續圖 1、圖 2……與報告範例不符，請統一充新編排。 三、公式(3) S 之定義不清。 四、公式(6) f 之定義不清。 五、統一定義空間座標系(圖 1.2、圖 6、圖 7、圖 9、圖 12、圖 14、圖 15……標示並不清楚是否一致)，P32 頁特別說明載具位置水平方向為 y，垂直方向為 z，而 P31 頁說明載具沿港灣牆壁下沉，與壁面維持 70 公分距離，種種敘述並不清楚。 六、水下管線之觀測路線是否在圖 22 上標示，否則無從	一、已更正。 二、已更正。 三、已重新定義。 四、已修正。 五、已訂正補充，謝謝。 六、觀測路徑為沿著管線長軸運動，已於報告中註	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、依處理情形辦理。 六、依處理情形辦理。

了解是否觀測至 L 型另一肘。	明。	
邱永芳 主任 一、4 年總結報告應將本計畫研究內容彙整提出，以利參考使用。 二、操作手冊應列出，應考量操縱合宜性。 三、簡化模組並與計算記錄模組結合，記錄分析方式應有說明。	一、遵照辦理。 二、操作說明已加入附件。 三、遵照辦理。	一、依處理情形辦理。 二、依處理情形辦理。 三、依處理情形辦理。
曾相茂 研究員 一、是否能將期中報告審查意見處理情形列表在報告內，以便參考。 二、本年度研究成果已按預定進度達到本所計畫之需求是值得肯定的且具實用價值。 三、第 2 頁「有強大水流下也可以長時間作業」，請問其上限為何？是多大水流下還可作業。	一、遵照辦理。 二、謝謝委員的評論。 三、載具前進方向可抗 4 節水流、側向與深度方向可抗 1.5 節。。	一、依處理情形辦理。 二、符合。 三、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(4/4) 期中報告

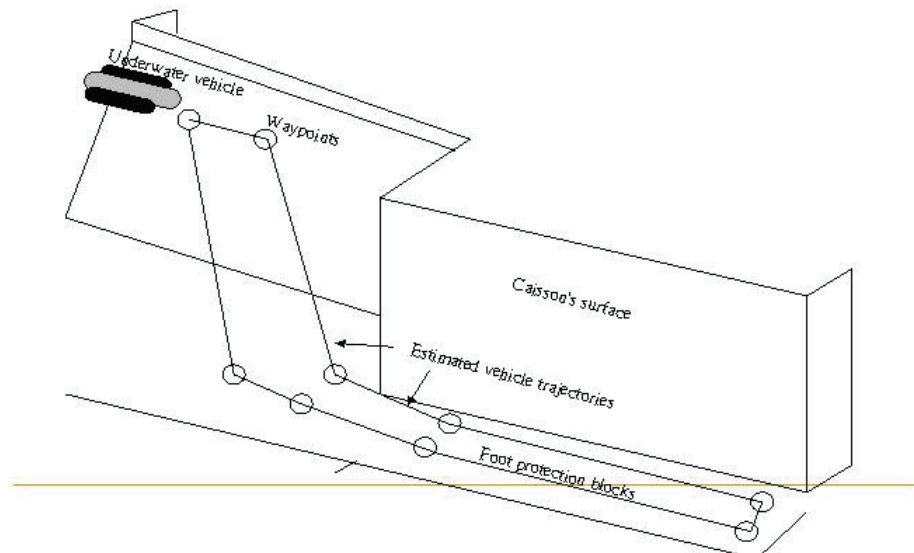
報告人：郭振華

國立台灣大學工程科學及海洋工程學系

研究目的

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

水下結構物表面觀測示意圖



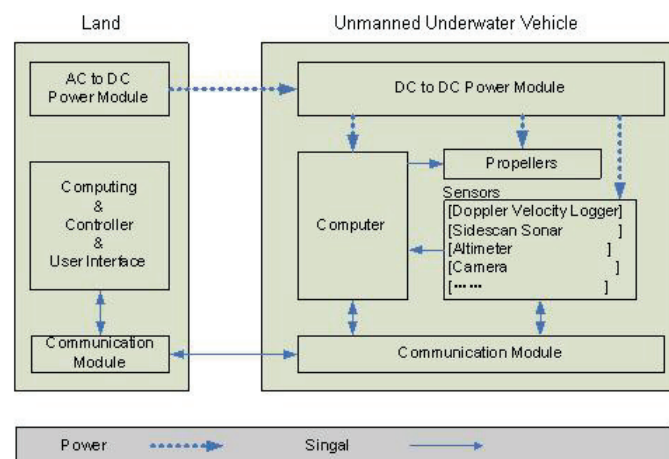
期中報告綱要

- 載具系統
- 導航與控制器設計
- 參考路徑設計
- 實驗數據
- 結語

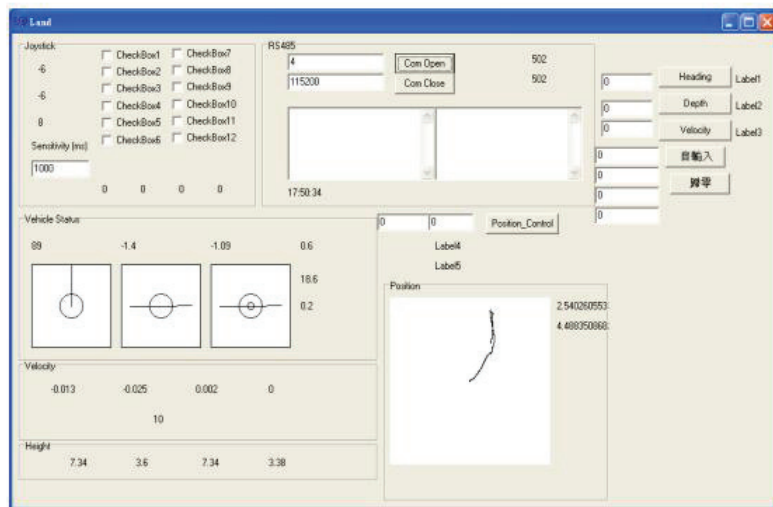
Vehicle Description



UUV Architecture



UUV User Interface



Damping Coefficient Identification

	Positive direction		Negative direction	
	Linear	Quadratic	Linear	Quadratic
Surge	4.26 $N \cdot \frac{s}{m}$	46.07 $N \cdot \frac{s^2}{m^2}$	9.55 $N \cdot \frac{s}{m}$	62.26 $N \cdot \frac{s^2}{m^2}$
Sway	5.95 $N \cdot \frac{s}{m}$	514.57 $N \cdot \frac{s^2}{m^2}$	3.59 $N \cdot \frac{s}{m}$	327.89 $N \cdot \frac{s^2}{m^2}$
Heave	10.55 $N \cdot \frac{s}{m}$	63.49 $N \cdot \frac{s^2}{m^2}$	10.70 $N \cdot \frac{s}{m}$	219.71 $N \cdot \frac{s^2}{m^2}$
Yaw	1.76 $N \cdot m \cdot s$	6.51 $N \cdot m \cdot s^2$	0.76 $N \cdot m \cdot s$	11.15 $N \cdot m \cdot s^2$

Model Reduction

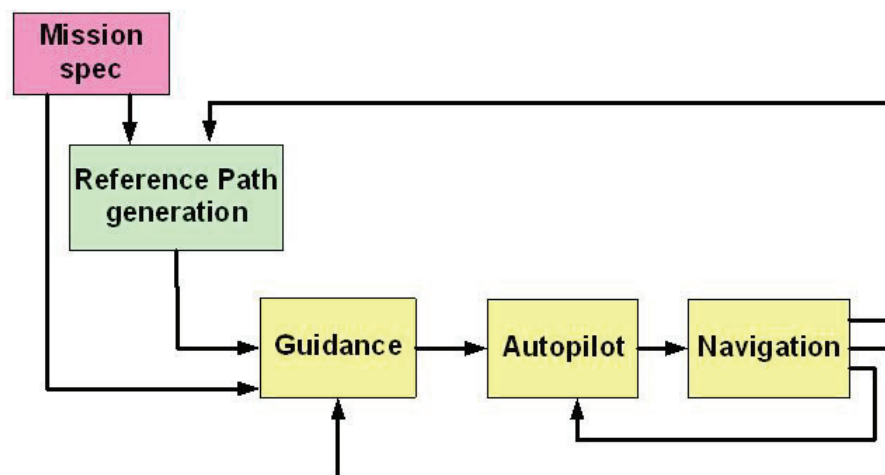
- According parameter identification results , the linear damping coefficient is far smaller than quadratic damping.
- Linearized motion equation about Yaw direction.

$$m_r \dot{r} + b_r r + c_r r^2 = f_r$$

$$m_r \dot{r} + 2c_r r = f_r$$

$$\Rightarrow \frac{r}{f_r} = \frac{\frac{1}{m_r}}{s + \frac{2c_r}{m_r}} \equiv \frac{b}{s + a} \quad \text{or} \quad \dot{r} = -ar + bf_r$$

Control Architecture

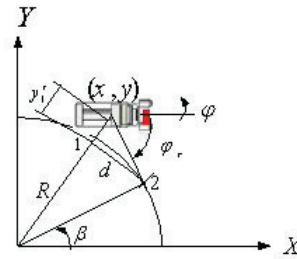


Guidance Design

- Assume the curved path is described by a series of circular paths with constant radius of curvature R .

- The line of sight angle $\tan \varphi_r = \frac{y - R \sin \beta}{x - R \cos \beta}$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \frac{d}{R}$$



- Combining $\tan \varphi_r = \frac{y(x^2 + y^2)^{1/2} - R[y \cos(d/R) - x \sin(d/R)]}{x(x^2 + y^2)^{1/2} - R[x \cos(d/R) + y \sin(d/R)]}$

- For large R , it can be reduced to straight-line path

Guidance Design

- The guidance law is based on the deviation rate from the commanded path.

$$\varphi_e = \varphi_r - \varphi$$

- The inertial position rate

$$\dot{x} = u \sin \varphi - v \cos \varphi$$

$$\dot{y} = u \cos \varphi + v \sin \varphi$$

Controller Design

- linear heading feedback control law based on

$$f_{r_0} = k_p(\varphi_r - \varphi) + k_d(-r)$$

- The system characteristic equation

$$S^2 + (a + bk_d)S + bk_p = 0$$

- The desired characteristic equation

$$S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2 = 0$$

- The controller gain

$$k_p = \frac{\omega_n^2}{b} = \omega_n^2 m_r$$

$$k_d = \frac{2\zeta\omega_n + a}{b} = 2(\zeta\omega_n m_r + c_r)$$

Controller Design

- The control law is written as

$$f_{r0} = k_p(\varphi_r - \varphi) + k_d(-r) + k_0$$

- At steady state the vehicle assumes a turning rate ,

$$r_s = \frac{1}{R}, \quad x_s = R \cos(r_s t), \quad y_s = R \sin(r_s t)$$

- Substituting into $\tan \varphi_r = \frac{y(x^2 + y^2)^{1/2} - R[y \cos(d/R) - x \sin(d/R)]}{x(x^2 + y^2)^{1/2} - R[x \cos(d/R) + y \sin(d/R)]}$

- Gets $(\varphi_r)_s = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(d/R)}{1 - \cos(d/R)}\right) + \frac{1}{R}t$

Controller Design

- Steady-state control effort is determined by yaw model

$$k_p \tan^{-1}\left(\frac{\sin(d/R)}{1 - \cos(d/R)}\right) - \frac{k_d}{R} + k_0 = \frac{a}{b} \frac{1}{R}$$

- Feed forward term k_0 can be evaluated, and k_p, k_d from straight-line derivate.

9-8

Stability Analysis

- When moving along the circular path with the vehicle at steady state, the equations of motion

$$\dot{\varphi} = r$$

$$\dot{r} = -ar + bf_r, \quad f_r = k_p(\sigma - \varphi) - k_d r$$

$$\dot{y} = u \sin \varphi + v \cos \varphi$$

$$\sigma = \gamma - \gamma_0$$

$$\tan \gamma_0 = \frac{\sin(d/R)}{1 - \cos(d/R)}, \quad \tan \gamma = \frac{R \sin(d/R)}{R + y'_1 - R \cos(d/R)}$$

Stability Analysis

- Linearization of the heading control system in the vicinity $\varphi = 0$, $r = 0$, $y = 0$ produces the linear system

$$\dot{x} = Ax, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -bk_p & -a-bk_d & -\frac{bk_p}{2R \tan(\frac{d}{2R})} \\ u & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Stability Analysis

- The characteristic equation of A

$$\lambda^3 + (a + bk_d)\lambda^2 + bk_p\lambda + \frac{bk_p u_0}{2R \tan(\frac{d}{2R})} = 0$$

- Applying Routh's criterion

$$(a + bk_d)bk_p - \frac{bk_p u_0}{2R \tan(\frac{d}{2R})} = 0$$

$$d_{crit}^R = 2R \tan^{-1}\left(\frac{u_0}{4\zeta\omega_n R}\right)$$

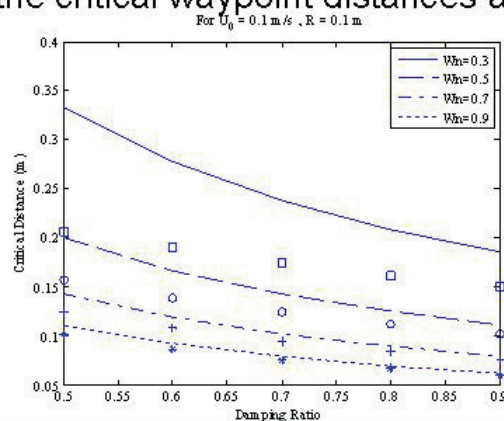
- For $d > d_{crit}^R$ all roots have negative real parts which means that the combined guidance and control law is asymptotically stability.

Critical Waypoint Distance

- The critical preview distance $d_{crit}^R = 2Ru_0 \tan^{-1}\left(\frac{d_{crit}}{2R}\right) < d_{crit}$
- Preview distance for a straight line is $d_{crit} = \frac{u_0}{2\zeta\omega_n}$ (large R)
- A stable guidance and control law for straight line segment will guarantee stability along curved path as well.
- Preview distance for a circular path is shorter than the preview distance for a straight line path.

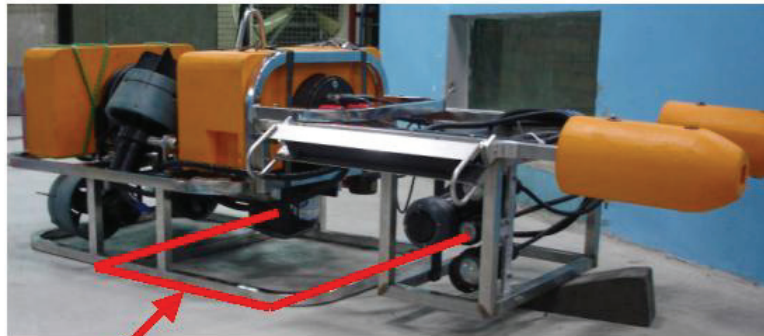
Critical Waypoint Distance

- For different natural frequencies at constant speed, the critical waypoint distances are:



Sensor placement

- Length between sonar and center of the vehicle is the preview distance.



Preview distance

Reference Path Generation Algorithm

- The new samples may be located after or before the last sample acquired, because it depends on vehicle's attitude and position.
- A grid map is generated after collecting many profile data.
- The reference path fed into the controller should be smooth.
- The critical distance is important in preview range.

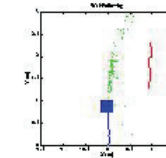
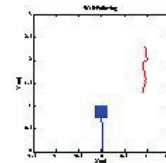
Estimate wall profile

- Estimate wall profile

$$P_w = \begin{bmatrix} x_w(t) \\ y_w(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + d \cos \varphi + Range \sin \varphi \\ y + d \sin \varphi - Range \cos \varphi \end{bmatrix}$$

- Offset wall profile

$$p_o = p_w + sn(t) \quad , \quad n(t) = \frac{1}{\sqrt{x_w'(t)^2 + y_w'(t)^2}} \begin{bmatrix} -x_w'(t) \\ y_w'(t) \end{bmatrix}$$

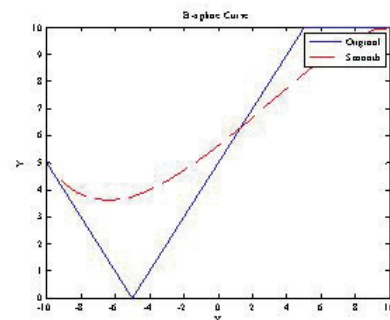


Smoothing by B-splines

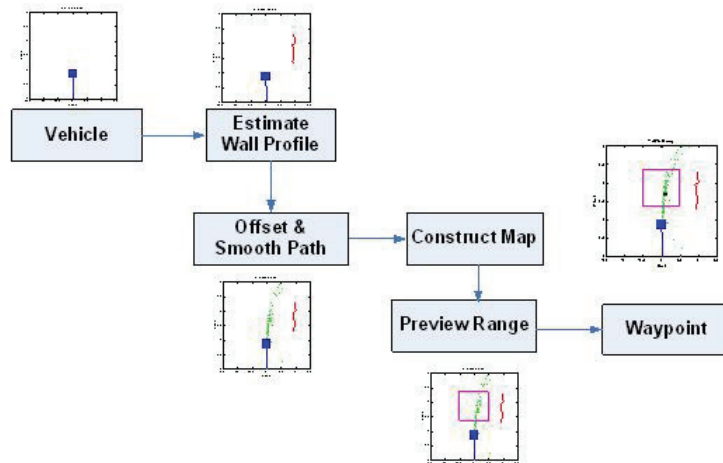
- B-spline curve is a function defined by polynomials

$$x(t) = \sum_{k=0}^N C_{x,k} B_{k,D}(t)$$

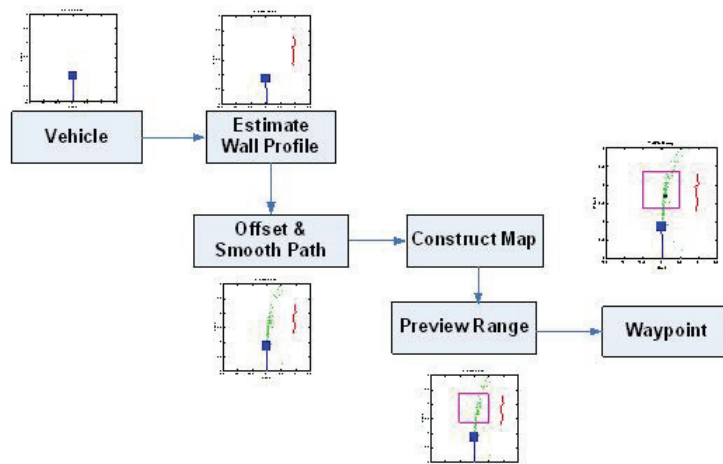
$$y(t) = \sum_{k=0}^N C_{y,k} B_{k,D}(t)$$



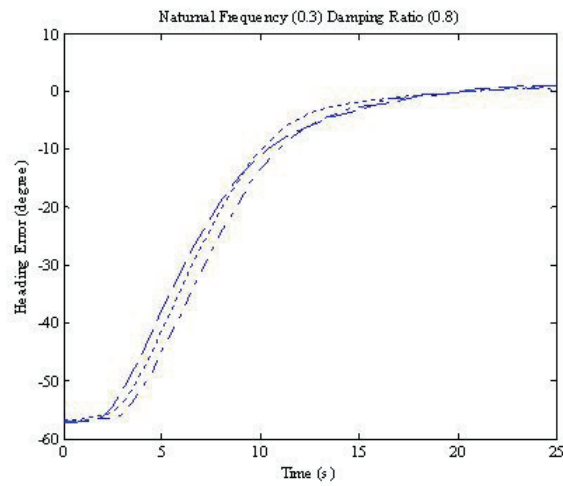
Reference Path Generation Process



Reference Path Generation Process



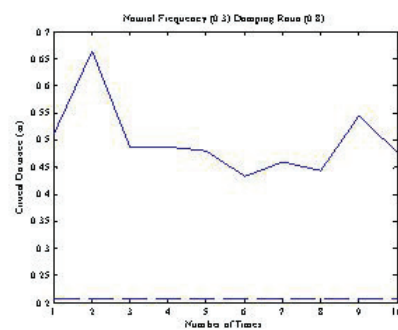
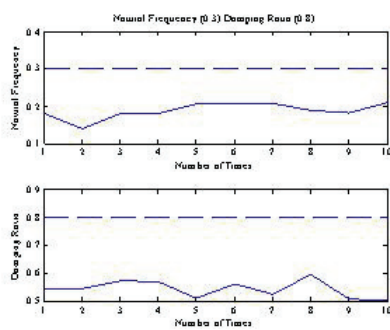
Step Response - Yaw



$$t_r \approx \frac{1.8}{\omega_n}$$

$$M_o = e^{-\frac{\pi \zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

Transient Specifications

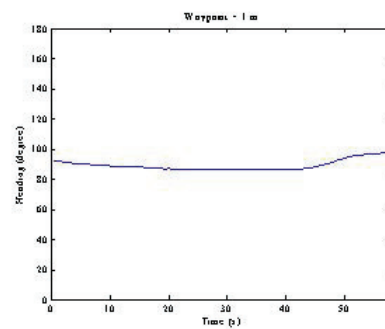
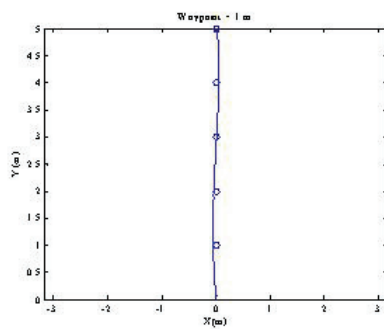


Critical Waypoint Distance

	Parameter	Mean	Variance	d_{crit}
Case I	$\omega_n = 0.3$	0.1876	0.0005	0.491
	$\zeta = 0.8$	0.5427	0.001	
Case II	$\omega_n = 0.5$	0.3018	0.0021	0.2804
	$\zeta = 0.8$	0.591	0.0021	
Case III	$\omega_n = 0.7$	0.442	0.0043	0.2466
	$\zeta = 0.8$	0.4588	0.0062	
Case IIII	$\omega_n = 0.9$	0.69	0.009	0.1631
	$\zeta = 0.8$	0.444	0.0041	

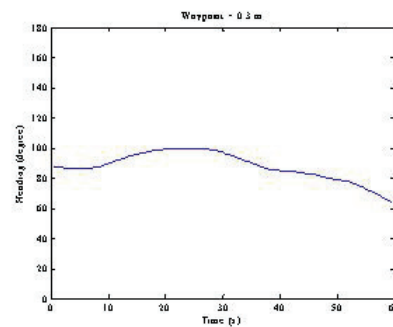
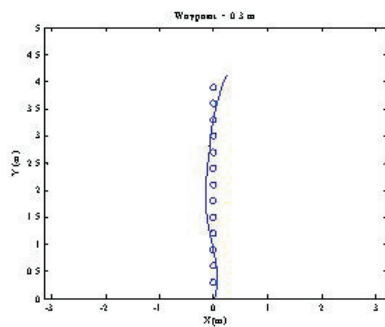
Waypoint Tracking

- Waypoint Distance = 1 m



Waypoint Tracking

- Waypoint Distance = 0.3 m



Wall-Following Experiments

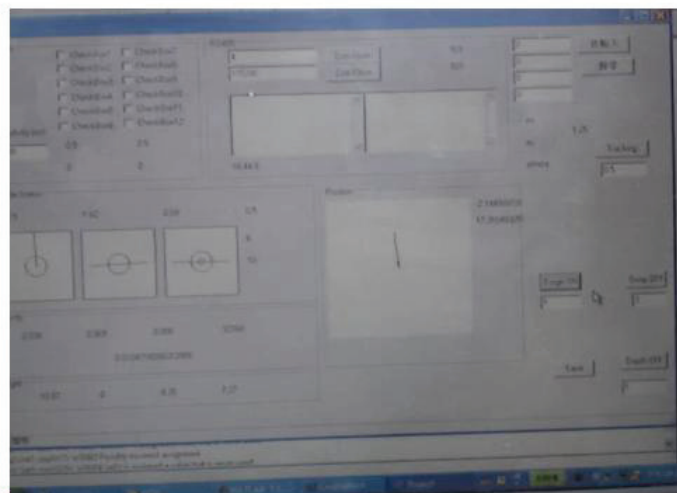


港灣水下攝影

Movie

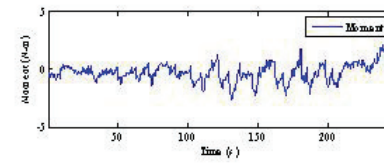
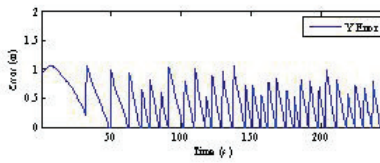
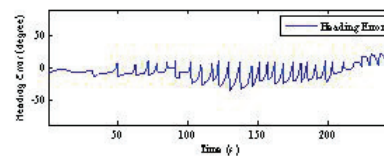
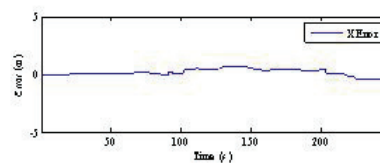
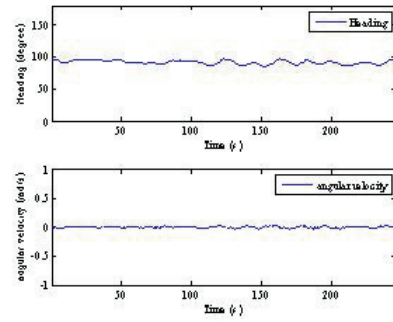
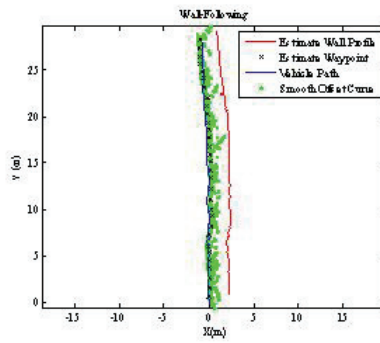


Movie



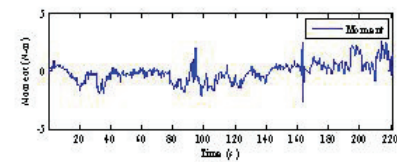
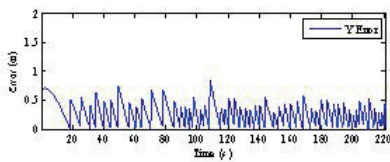
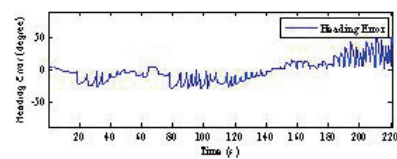
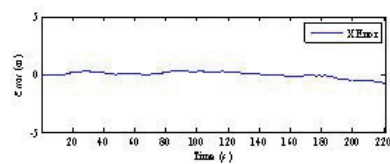
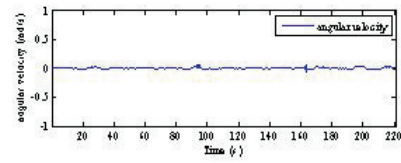
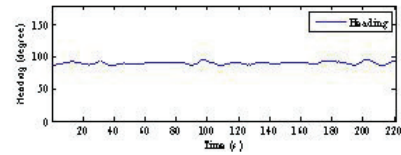
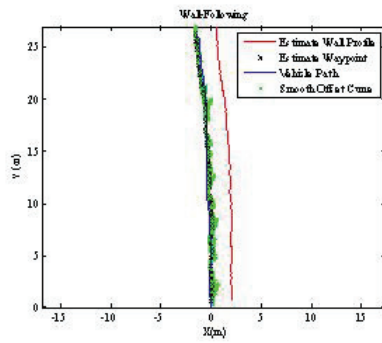
Wall Following

- Waypoint Distance = 0.7m



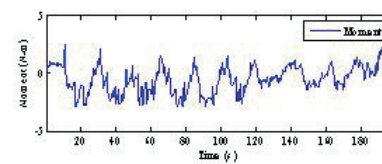
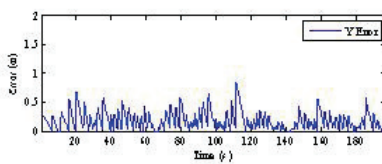
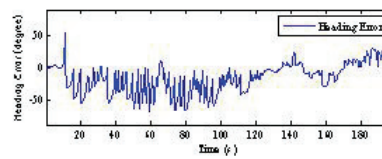
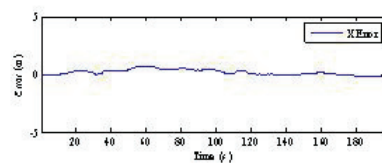
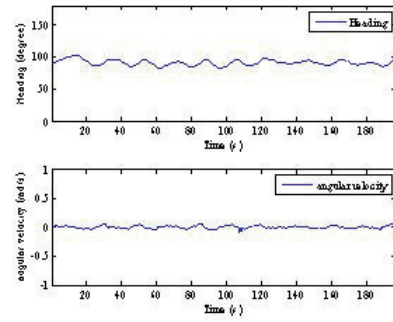
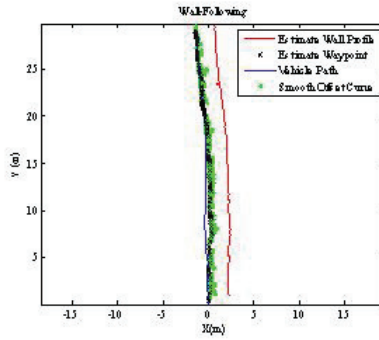
Wall Following

- Waypoint Distance = 0.5m



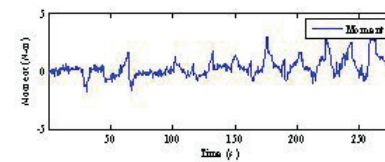
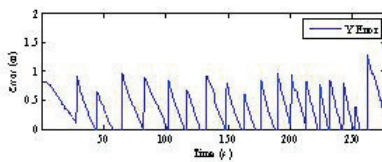
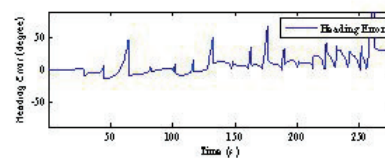
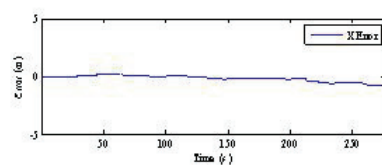
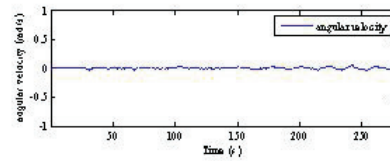
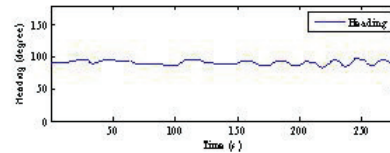
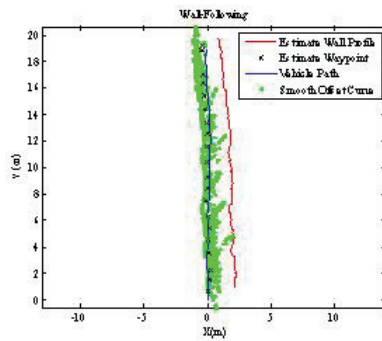
Wall Following

- Waypoint Distance = 0.3m



Wall Following

■ Path of wall-following plus depth control



Conclusions

- There exists a critical distance between the waypoints for the stability of guidance and control.
- An algorithm was proposed to generate a smooth reference path from measurements of an underwater structure surface distance.
- The surge velocity and preview range affect also the vehicle's tracking performance.
- Experiment result shows that the proposed wall-following technique successfully navigate the UUV with precise control near a harbor wall.

Thanks for your attention

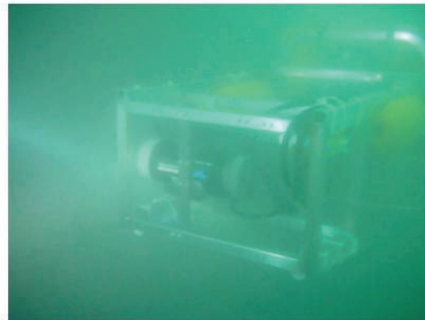
附錄四 期末簡報資料

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(4/4)
期末報告

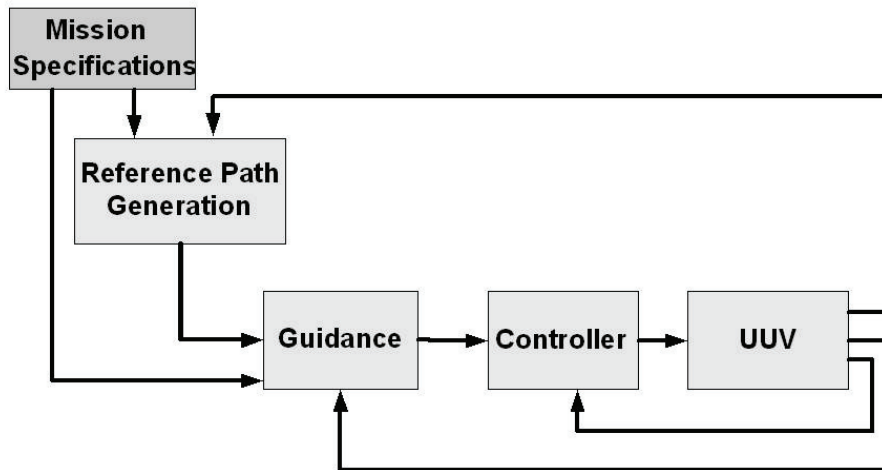
報告人：郭振華
國立台灣大學工程科學及海洋工程學系

Outline

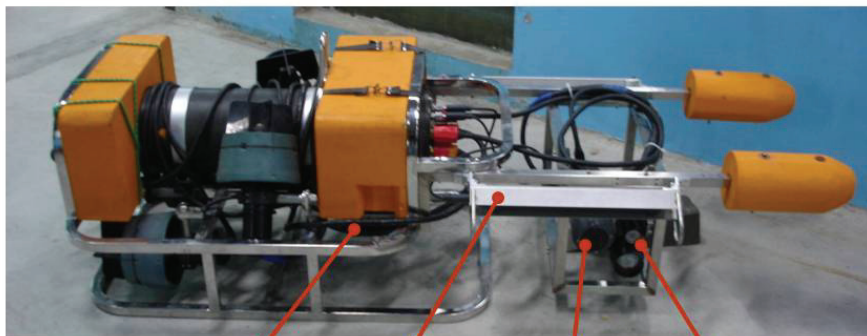
- UUV System
- Guidance and Control
- Image Mosaicking
- Target Detection



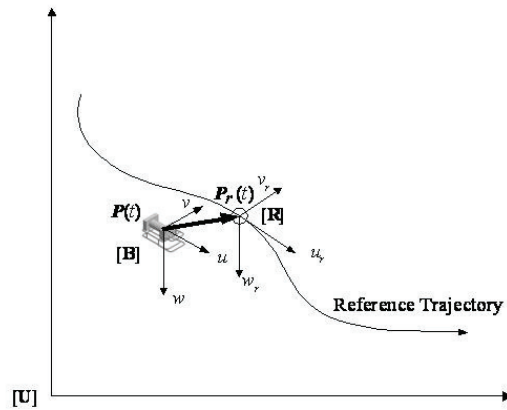
UUV System



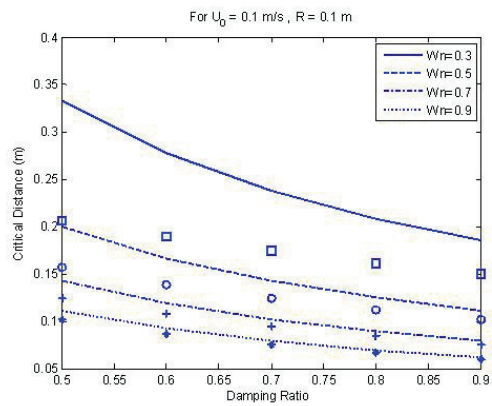
Sensors



DVL Sidescan module Altimeter Camera



Control System Stability



Preview distance

Image Mosaicking

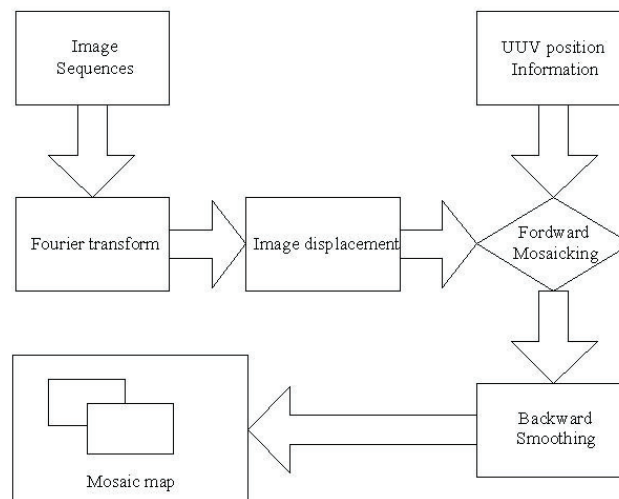
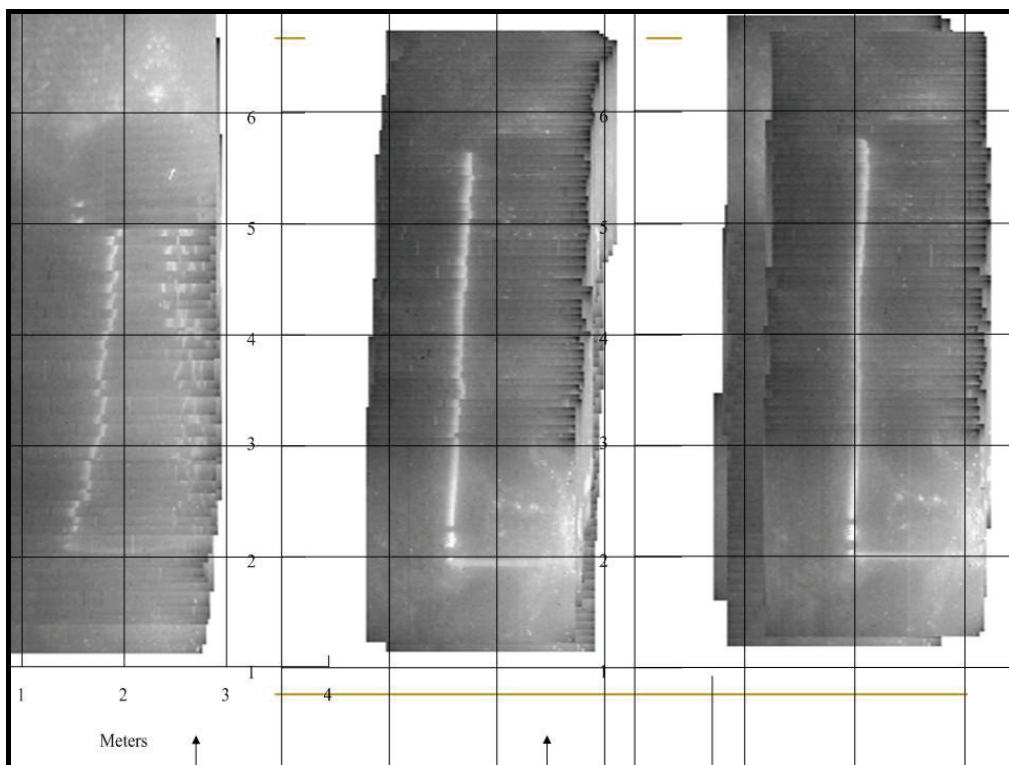
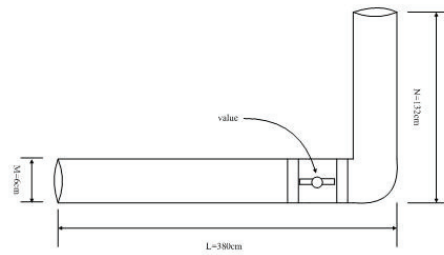
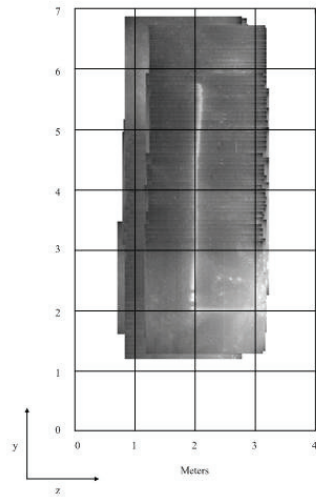
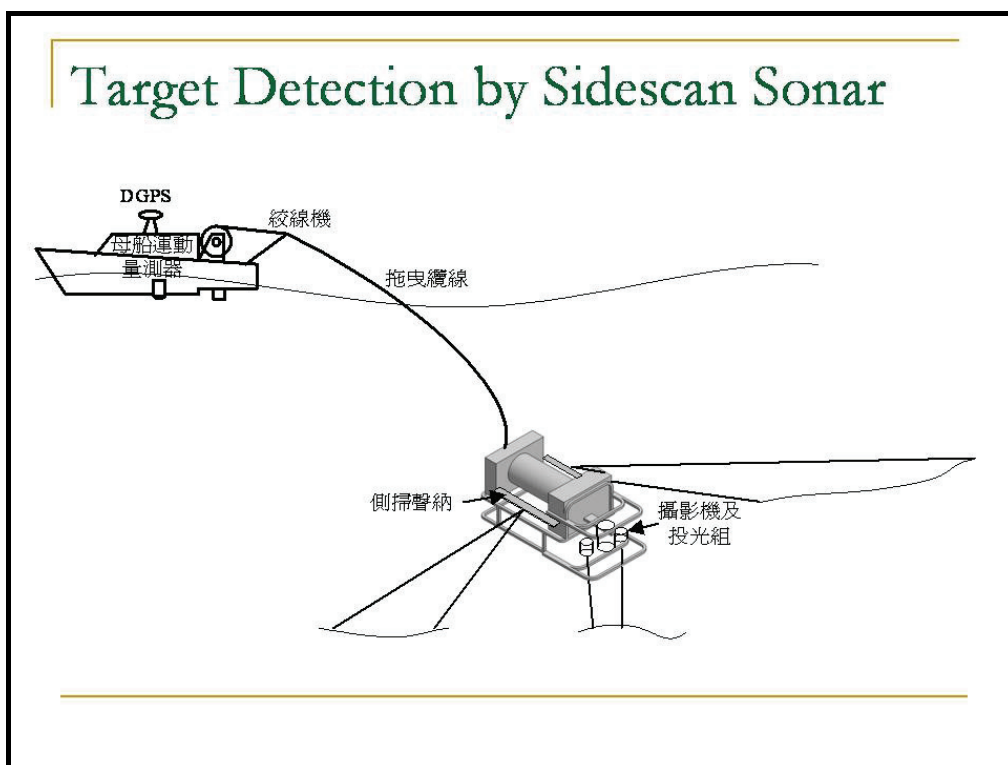
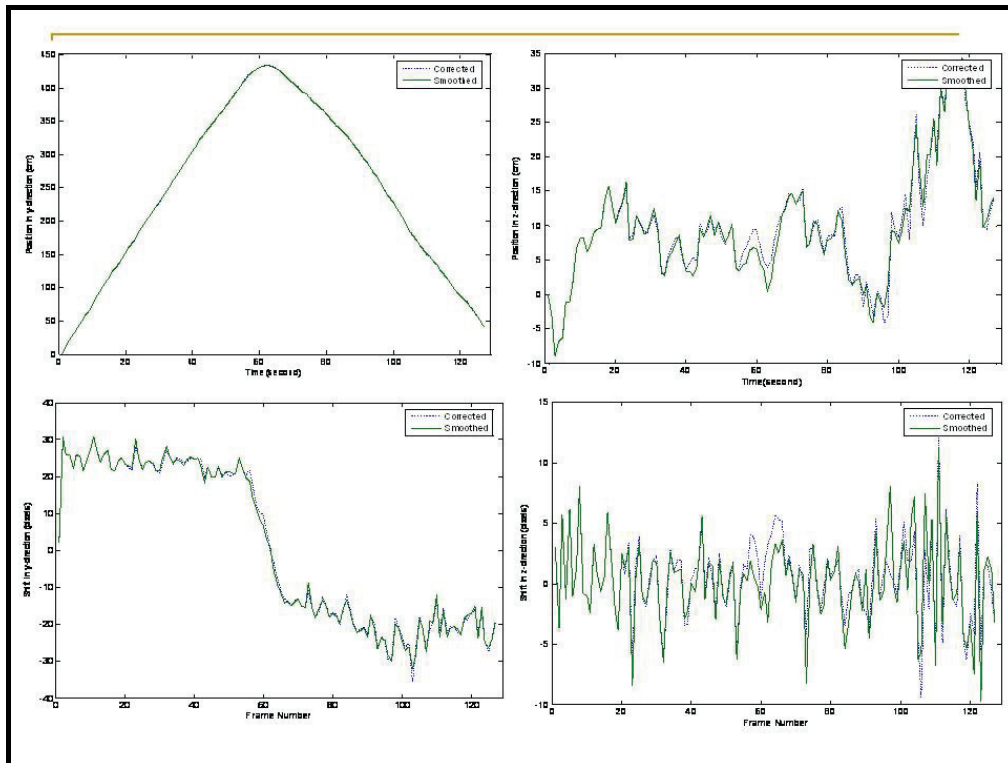
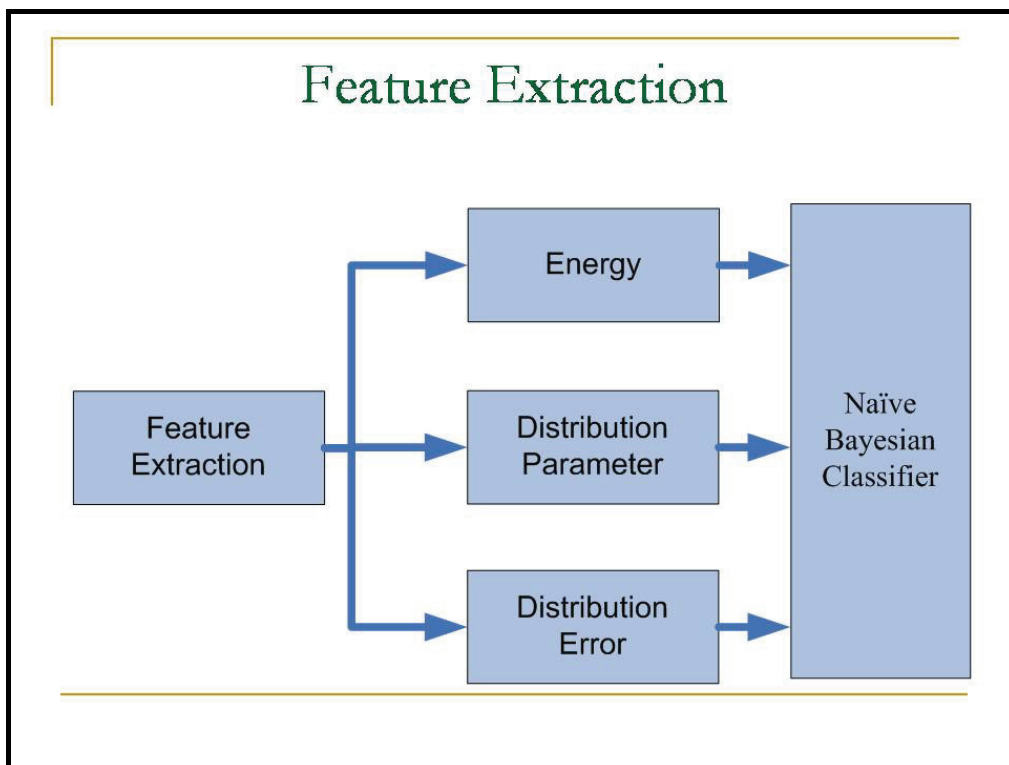
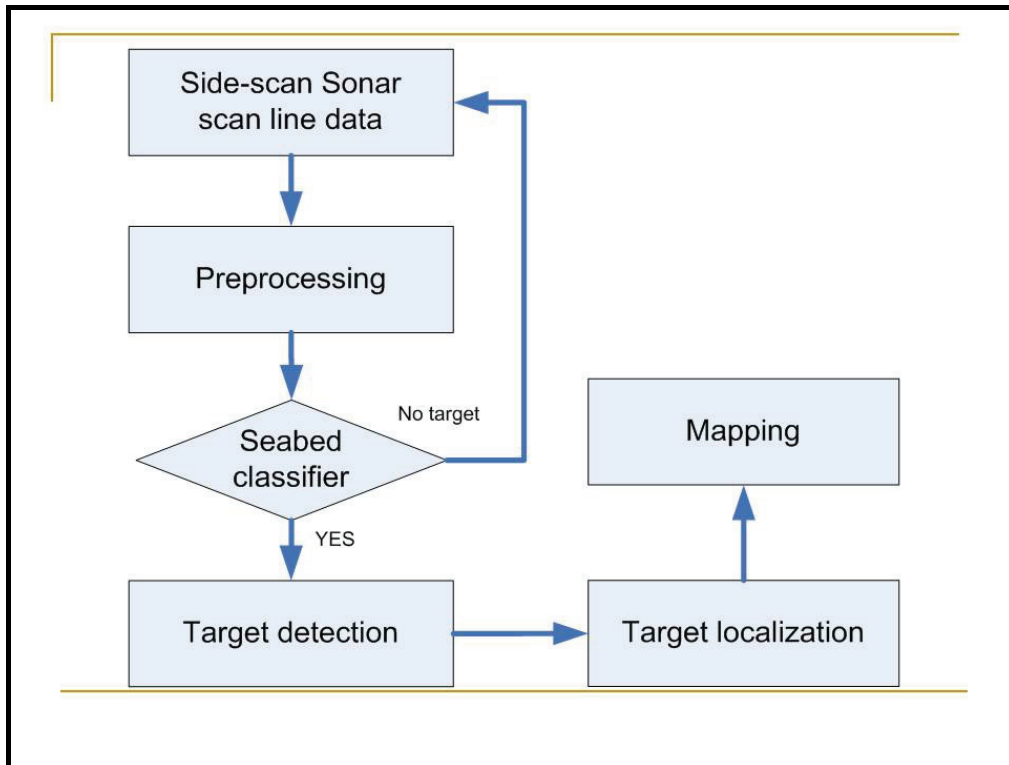


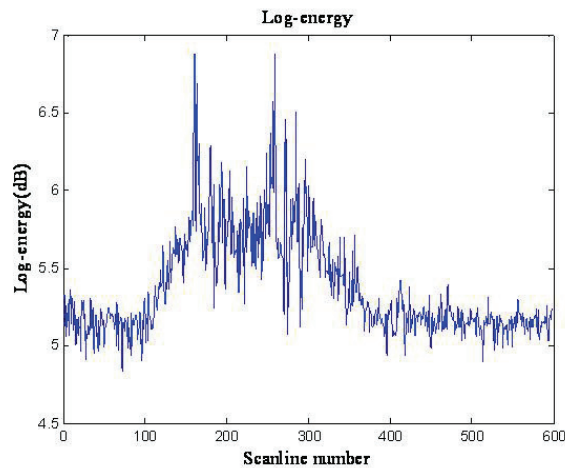
Image Mosaic of a Pipeline







Log-energy



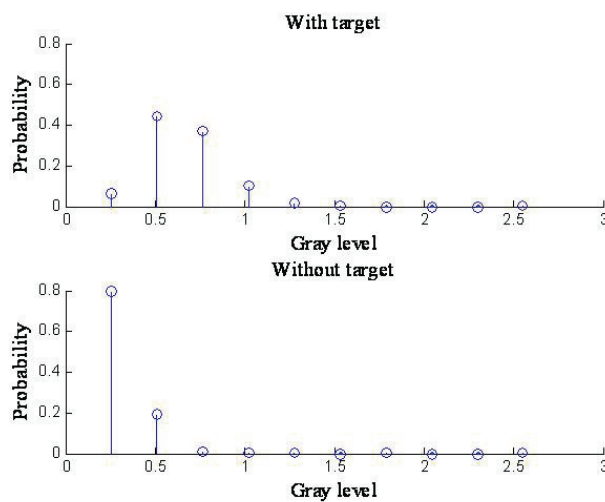
$$E_n = \log_{10} \left(\epsilon + \frac{1}{L} \sum_{n=0}^L s^2(n) \right)$$

ϵ : a small positive constant

L : window size

s : signals in frequency domain

Parameter of distribution



$$N(Y) = \frac{2m^m Y^{2m-1}}{\Gamma(m) \Omega^m} e^{\left(\frac{-m Y^2}{\Omega} \right)}$$

$$m = \frac{[E(Y^2)]^2}{E[Y^2 - E(Y^2)]^2}$$

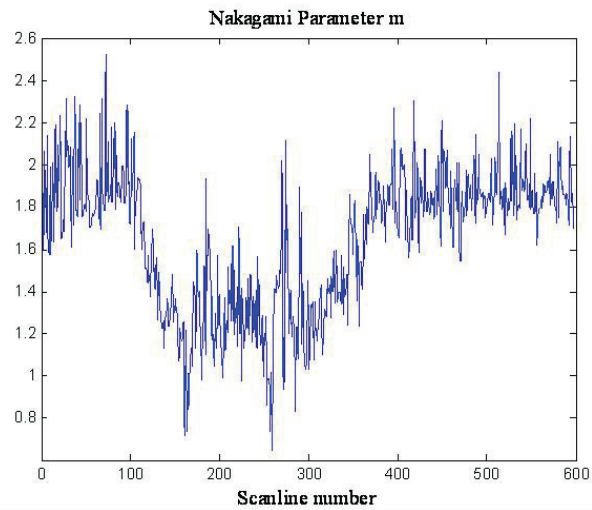
$$\Omega = E(Y^2)$$

Y : Normalized signal

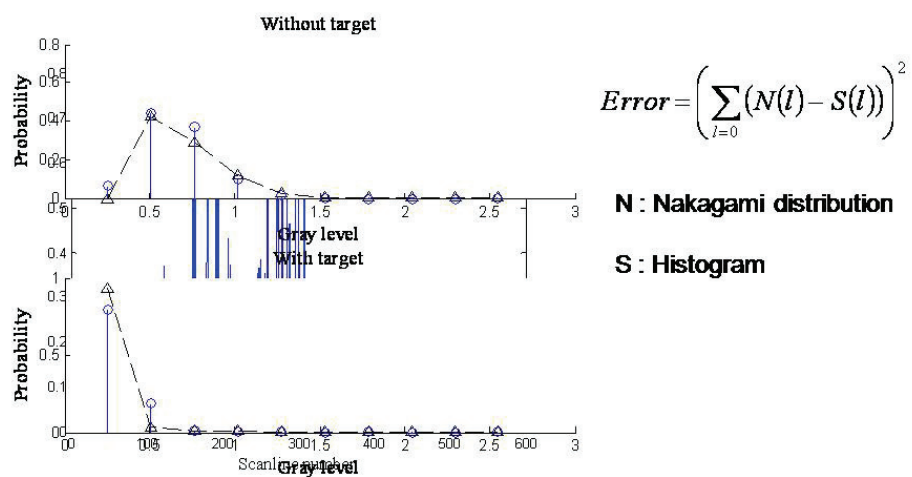
m : Shape parameter

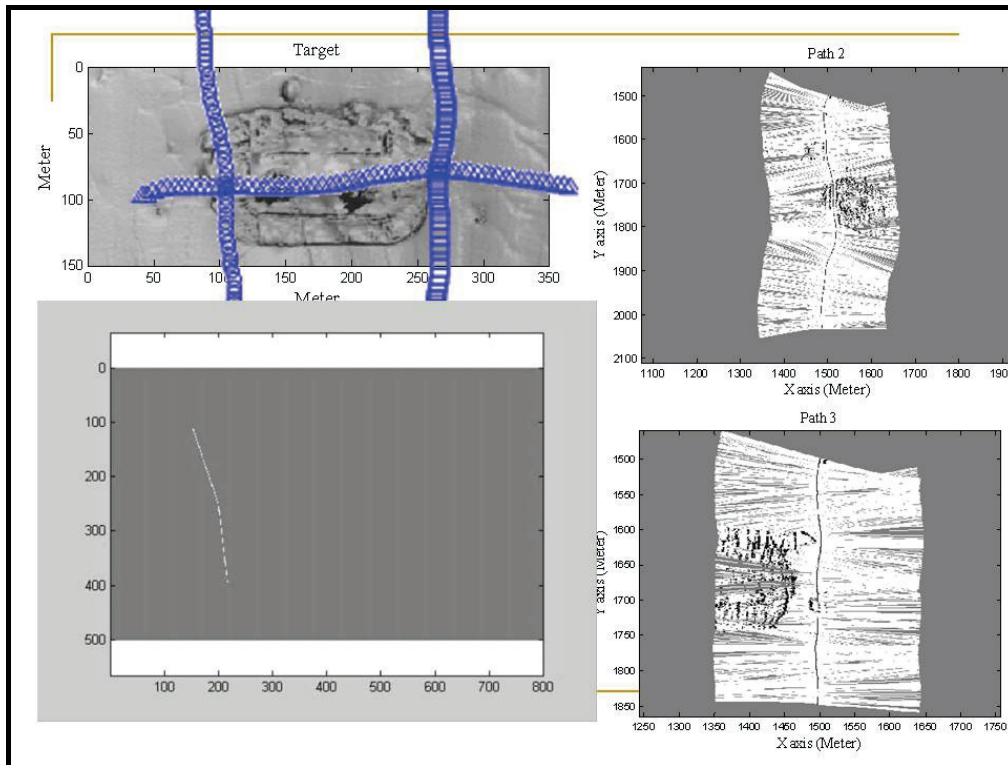
Ω : Spread parameter

Parameter of distribution



Prediction Error





Underwater Structure Profile Following Controller for Unmanned Vehicles

Conclusions

- An algorithm was proposed to generate a smooth reference path to track for an UUV from measurements of an underwater structure profile.
- A mosaicking technique was developed to reduce inconsistency in image mosaics and to provide humans with a view to the underwater scene.
- A detection method was proposed for an UUV to use sidescan sonar scalines for detecting target in real time and improve UUV navigation capability.

Thanks for your attention