

以類神經網路為架構 之自主式水下載具適應控制

王傑智¹ 郭振華² 邱逢琛³

摘要

自主式水下載具是一具自由行進，在某些功能上不須外部控制而能依自有規範而行動的水下儀器承載平台。由於自主式水下載具的系統本身及所處環境都存有非線性與不確定性，使得自主式水下載具控制器的設計變的複雜與困難。本文提出以類神經網路為架構之適應型控制器，用以達成自主式水下載具之方向控制。由磁式角度感測器測得方向角及方向角速率，再利用左右螺旋槳之推力差以達到方向角的控制。類神經網路的適應學習是藉由減少由誤差量及控制器輸出變化率加權而成之成本函數來達。實驗結果證明隨訓練次數及時間的增加，控制器能很快適應系統及環境的特性，達到控制的要求。本法不需對載具及所處環境有太多的了解，因此本法可充分應付當載具配載不同儀器所造成的動態變化或在不同海域工作所面臨的環境變化等問題。本文中之實驗是在台灣大學游泳池內，以本所自行發展之自主式水下載具試驗機為驗證的對象。

1 前言

近年來自主式水下載具不管在商業上或軍事上已引起廣泛的注意。在台灣隨著港埠建設、海岸開發、海洋調查以至海底管線布設等涉及水下技術之需求日增、以及潛水作業人員高齡化、稀少化所導致之潛水作業成本高漲，而相對的在計算機技術、自動控制及人工智慧技術日益精進之背景下，使得無人水下作業系統智慧化之趨勢益形明顯。而跟其他承載水中觀測儀器工具的比較上，自主式水下載具比一般船舶更接近觀測物體，較不易受海象影響，比線控水下載具有更大的使用範圍及使用深度，比一般的載人潛艇更便宜且沒有人員上安全的顧慮。有鑑於此，台灣大學造船及海洋工程研究所結合相關領域教授發展一兼具巡航與徘徊功能之自主式水下載具試驗機，供今後各類相關技術研究發展之用。圖1及

¹ 研究生，國立臺灣大學造船及海洋工程研究所碩士班。

² 副教授，國立臺灣大學造船及海洋工程研究所。

³ 教授，國立臺灣大學造船及海洋工程研究所。

圖2為本所發展之自主式水下載具試驗機及其大部結構組成。表1為自主式水下載具試驗機之主要規格。

除了發展自主式水下載具試驗機外，本所亦同時發展一自主式水下載具操控運動模擬系統。利用此系統我們可決定穩定舵及控制面最佳的尺寸及位置，以及描述移重系統、拋載系統、控制面及主推進系統對載具動態之影響。本文即先運用此操控運動模擬系統訓練類神經網路控制器，並驗證類神經網路控制器的效能，再行置入自主式水下載具試驗機進行實驗。本所發展之操控運動模擬系統詳見(邱、王，1993；郭，1994；邱、1994；Guo、Tsai、Chiu，1995)。

在水文觀測、管路調查或水雷佈放這樣的任務中，往往需要自主式水下載具做方向的維持或命令方向的追隨。由於自主式水下載具其系統及所處的環境都存有非線性與不確定性，使得傳統控制方法在面臨自主性水下載具這樣的系統時會有許多的困難。

以類神經網路為架構之學習型控制器在許多的應用場合上都已獲得有效的確認。至於類神經網路的基本理論讀者可參閱 (Miller、Sutton、Werbos，1991)。使用類神經網路作為控制器的優點為當設計控制器時並不需要完全瞭解受控系統的動態，而且這些網路的適應性、抗干擾及高度平行運算的能力也使得他們成為許多控制應用中優先的考慮。最近幾年來有一些以類神經網路為架構設計水下載具控制器的方法被提出討論。Fuji、Ura(1991)提出一種自我組織型類神經網路控制器用以控制自主式水下載具之俯仰運動。這個控制器包含一個控制器網路及一個水下載具動態的網路。先使用一模糊控制器作為預先控制器，直到此控制器適應系統動態才切換給此控制器控制。水下載具動態網路以實際水下載具動態為學習的對象，控制器的適應則是由水下載具動態網路回傳的訊號而得。此控制系統已在水槽測試驗證其可行性。Yuh(1990)提出以三層的類神經網路為架構之線上類神經網路控制器，不同於Fuji、Ura，控制器網路的學習訊號則是直接由載具的追隨誤差而得。由Yuh其模擬的結果可看出此控制器良好的軌跡追隨性，並且由環境的干擾及系統參數的變化討論控制器之強健性。Venugopal et al. (1992)則針對Yuh的控制器提出改良的方法。針對控制系統的穩定性，在控制器網路與受控系統中放入一增益層。他們指出藉由網路學習速率的調整可影響控制系統的動態反應及軌跡追隨的表現，亦由模擬結果指出針對自主式水下載具動態干擾其控制器有足夠之強健性。在本文中，我們提出一線上學習之類神經網路控制器用以控制自主式水下載具在水平面上的運動，學習的方法為回傳誤差傳遞演算法，類神經網路加權值的適應則是藉由減少誤差量及控制器命令變化率加權而成之成本函數來達成。本文之架構為：第二節說明控制器設計方法；第三節是我們使用此控制器控制自主式水下載具操控運動模擬系統及試驗機實驗的結果；第四節是我們討論使用類神經網路為架構設計控制器一些實作的問題。

2 控制系統設計

整個自主式水下載具外部環境及內部系統均是高度非線性系統。而影響非線性的參數數目則非常大，如流體力係數、螺旋槳動態等，這些參數一般無法明確的掌握。而且自主式水下載具所面臨像海洋這種高度不確定性的工作環境及大範圍操作的要求，用傳統以模型為基礎的控制器設計方法需要在系統的鑑定及控制器設計上花費龐大的工夫。基於上述理由，類神經網路將可是自主式水下載具適合的控制架構。在本文中，我們使用一多層正向傳播網路作為自主式水下載具運動控制器。本網路可視作一動態系統隨著一性能指標適應受控系統，加權值的更新則使用回傳誤差傳遞演算法。

控制系統的架構見圖3，其中 ψ 表示自主式水下載具的航向角，時間 t_k 之軌跡追隨誤差是指在時間 t_k 之命令軌跡與水下載具軌跡的差，由於載具動態時間的離散化，在時間 t_k 由神經網路控制器所產生的控制命令將持續影響載具動態到時間 t_{k+1} ，因此連結類神經網路之加權值的更新乃使用上個時間間隔的資料。下節將由模擬與實驗驗證此控制系統的性能。自主式水下載具的航向角控制是藉由左右螺旋槳推力變化來達成，見圖4。在本圖中， T_0 是指以牛頓為單位的固定推力，而 $L = T_0 + \Delta T$ 是指左螺旋槳的命令推力， $R = T_0 - \Delta T$ 是指右螺旋槳的命令推力。我們選用一個三層的類神經網路作為控制器的架構，其中包含兩個輸入層節點、五個中間隱藏層節點及一個輸出層節點(2x5x1)。網路大小的決定是由不同大小之類神經網路控制器控制自主式水下載具操控運動模擬系統嘗試而得。網路的輸入分別為 e 及 \dot{e} ，其中 e 是指命令的航向角 ψ_d 與實際系統航向角訊號 ψ 的追隨誤差，也就是 $e = \psi_d - \psi$ 。在這裡需注意的是追隨誤差的微分 \dot{e} 是先通過一濾波器再進入類神經網路控制器內，然後網路輸出螺旋槳推力差量命令 ΔT 給螺旋槳。

網路的訓練分成兩個階段：

第一階段：令此類神經網路控制架構學習一簡單的線性控制器，在這一階段使用自主式水下載具操控運動模擬系統為受控系統。如圖5，任選一PD控制器做為學習的對象，經過20,000次的學習，均方根誤差小於0.012。在學習結束後關閉線性控制器，直接由類神經網路控制器直接控制受控系統。這階段的目的是為了提供控制器初始的加權值並驗證控制器的可行性。

第二階段：使用第一階段所產生的連接加權值作為實驗時的初始加權值。實驗是在台灣大學游泳池內，以本所自行發展之自主式水下載具試驗機為類神經網路控制器驗證的對象。在這一階段，為了提高航向追隨的性能並且同時減少太高的控制命令變化，我們定義一成本函數同時包含追隨誤差及控制命令的變化率：

$$J(t_k) = \frac{1}{2} \left[\alpha \left(\psi_d(t_{k+1}) - \psi(t_{k+1}) \right)^2 + \beta \left(\Delta \dot{J}(t_k) \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中 α 及 β 為固定值，其值可針對載具性能或控制器能量的考慮來調整控制器的性能。在下節可看到因為在訓練過程中明顯考慮致動器的限制，藉由 α 和 β 我們可在追隨表現及控制器能量獲得滿意的表現。

3 模擬及實驗結果

我們分別由模擬及實驗來驗證控制器的可行性。在模擬測試中，載具的動態反應是由自主式水下載具操控運動模擬系統中運動方程式數值積分得來，類神經網路的大小為2x5x1 其中共有21個連接加權值，在每個時間間隔內做十次的加權值更新之線上學習。時間間隔在模擬及實驗均訂為0.05秒，回傳誤差傳遞演算法的學習速率為0.001。

3.1 模擬結果：

圖6為控制器追隨一步階命令的載具航向角反應及控制器輸出之推力差量。模擬的結果與實驗的結果非常近似，由此可指出自主式水下載具操控模擬系統的適用性。

圖7則是當螺旋槳參數變動下的步階反應。在這個例子中，在相同的命令下右螺旋槳總比左螺旋槳有較大的螺旋槳推力係數，它使右螺旋槳比左螺旋槳多出 5 牛頓的推力。由模擬結果可看出控制器在線上適應了這 5 牛頓的系統變動，由此可指出類神經網路控制器的適應性。

圖8則是在訓練時只考慮追隨軌跡誤差所造成高的控制命令變化率。

3.2 實驗結果：

圖9及圖10則是分別針對部階與sin波之航向命令的實際試驗機航向動態反應。如同前面所指出的，圖6與圖9的結果非常近似。圖中左右螺旋槳的推力是直接由力量感測器測量得到，控制命令 ΔT 則是由角度感測器所量得的航向角經過前述之處理輸入控制器而得。

圖11及圖12則說明了控制器針對持續及突然的干擾之強健性。由測得螺旋槳推力的資料中，我們可觀察到控制器針對外在環境干擾所做的學習，藉由連接加權值的改變來提供正確的控制命令，達到令人滿意的航向軌跡。

圖13說明控制器針對系統慢的參數變化之強健性。水下載具在不同的前進速度下，載具所受的流體力亦不相同，藉由此項性質來驗證系統參數變化時控制器之強健性。由圖可看出在不同的初始航向角及不同的推力下，控制器均能適應系統動態的變化。由此例子證明以類神經網路控制架構可用來作為水下載具之強健控制。

4 討論

一般在設計以類神經網路為架構之適應控制器中有兩種主要不同方法，直接控制法與非直接控制法(Miller、Sutton、Werbos, 1991)。在非直接控制法中，先用一正向傳播網路鑑定出系統的反動態，再由此鑑定出的網路預估出控制器的誤差，下一步由此誤差訓練控制器網路架構。從我們研究當中，發現用前向傳播網路來學習系統動態是視系統而定的，它往往需要較大及較複雜的網路架構來鑑定系統，這樣同時也造成大量的學習時間。因此，這樣的方法並不適合用於控制時變系統，或在需要在不確定性環境下操作的系統。相反的，在直接控制法中我們只需要一個小的網路而且也不需太多的計算時間。一般而言，自主式水下載具在記憶體空間及電腦執行速度都有限制，因此並不希望像航向控制這類基本性能控制佔掉自主式水下載具電腦太多的運算時間及記憶空間。很明顯的，一個簡單且有效的控制方法將更適合用於實際的操作上。

5 結論

由上可知，以直接控制法設計類神經網路適應型控制器用於自主式水下載具的航向控制是可行的。不論是模擬或是在游泳池以自主式水下載具試驗機實驗均證實這項結論。在本文中，我們已驗證下列兩項結果：

(1)線上類神經網路控制法可應付未知系統動態的情況以及適應慢的或快的時變干擾，達到控制的要求。

(2)本控制器的設計方法比較簡單，同時所需的記憶體容量及電腦計算速度都很低。

未來的研究方向則在於以類神經網路為架構發展自主式水下載具試驗機之深度控制器。

謝誌

本文承國科會鼎力支持，惠予計畫編號NSC84-2611-E-002-026之研究案經費補助，使得相關研究工作得以順利進行，特此誌謝。

參考文獻

- 1.邱逢琛、王傑智(1993)，"無人潛艇動態及控制系統之模擬"，國科會大學生參與專題研究計畫成果報告NSC83-0115-C002-01-098E。
- 2.郭振華(1994)，"實驗用水下載具系統設計與運動控制之研究(I)"，國科會計畫報告NSC83-0209-E-002-019。
- 3.邱逢琛(1994)，"高操控性自主式水下載具運動模擬與操控性能研究(I)"，國科會報告NSC83-0209-E-002-004。
- 4.Fuji,T.and Ura,T.(1991)，"Neural-Network-Based Adaptive Control Systems for AUVs", *Engng.Applic.,Artif.Intell.*,V.4,N.4,p309-318.
- 5.Guo,J. and Tsai,J.F. and Chiu,F.C.(1995),"Desigh,Simulation,and Control of a Highly Maneuverable Autonomous Underwater Testbed",MARIENV'95,Tokyo,Japan,September 24-29.
- 6.Miller,W.T. and Sutton,R.S. and Werbos,P.J.(1991),"Neural Networks for Control", MIT Press.
- 7.Rumelhart,D.E.,et al.(1986),*Parallel Distributed Processing*,MIT Press.
- 8.Venugopal,K.P. and Sudhakar,R. and Randya,A.S.(1992),"On-Line Learning Control of Autonomous Underwater Vehicles Using Feedforward Neural Network",*IEEEJ.Ocean.Eng.*,V.17,N.4,pp308-319,October.
- 9.Yuh,J.(1990),"A Neural Network Controller for Underwater Robotic Vehicles",*IEEEJ.Ocean.Eng.*,V.15,N.3,pp161-166,July.

表1：自主式水下試驗機之主要規格

Items	Particulars
Dimensions	2.0m(L)×1.0m(W)×0.6m(H)
Weights	about 500kg in air ,neutral in water
Operating depth	50m
Max. Speed	4.0 kt
CPU	MVME 187 RISC Processor
Memory Capacity	16 MB
Thrusters	Horizontal 2×200W Vertical 1×100W Control Surface 2×10W Trim Weights 2×20W
Battery	Lead-acid battery 10×12V×26AH
Sensors	Obstacle avoidance sonars Altimeter Depthometer Accelerometers Rate gyros



圖1：台大造船及海洋工程研究所發展之水下載具試驗機

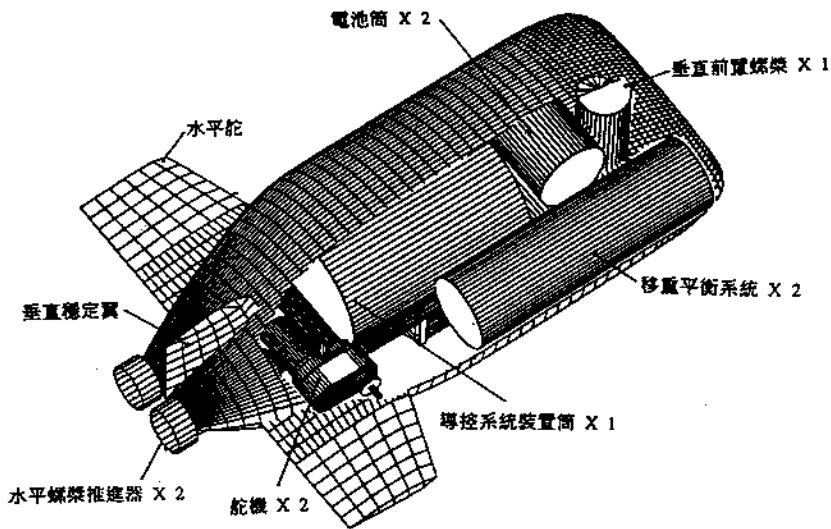


圖2：自主式水下載具之大部結構組成

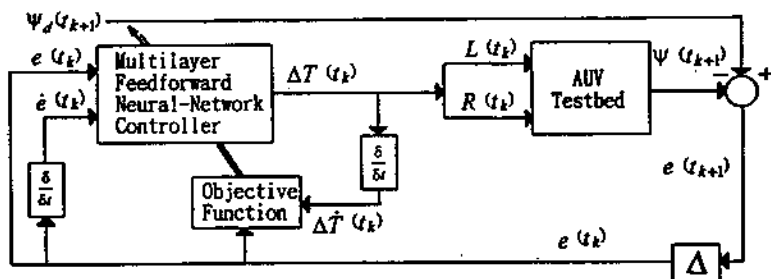


圖3：類神經網路控制系統架構圖

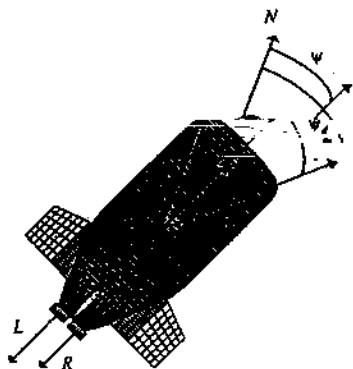


圖4：自主式水下載具之航向控制

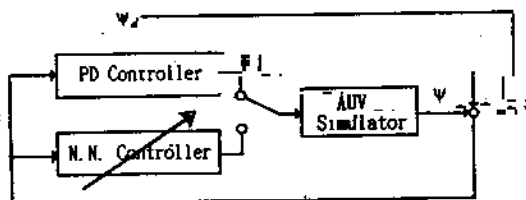


圖5：類神經網路訓練與控制架構圖

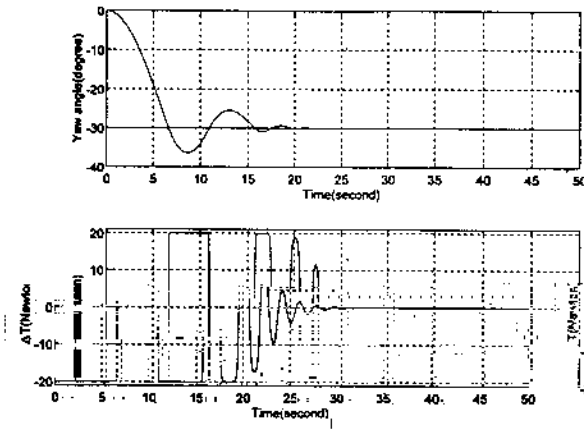


圖6：水下載具追隨步階航向命令之模擬結果

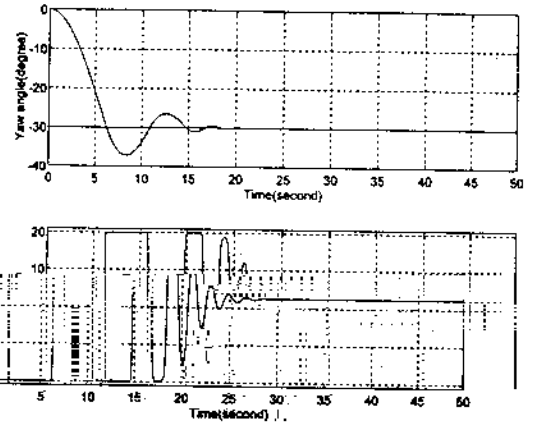


圖7：水下載具在螺槳參數變化下追隨步階航向命令之模擬結果

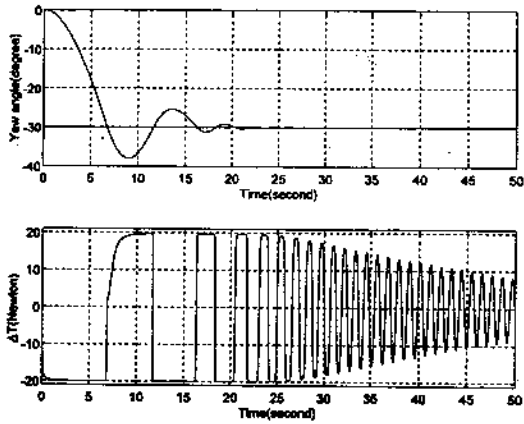


圖8：只針對追隨誤差訓練之模擬結果

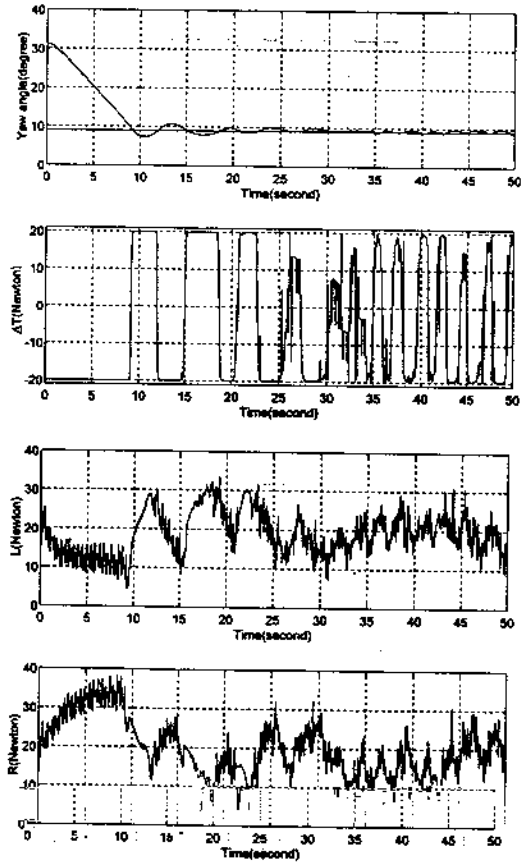


圖9：水下載具試驗機追隨步階航向命令之實驗結果

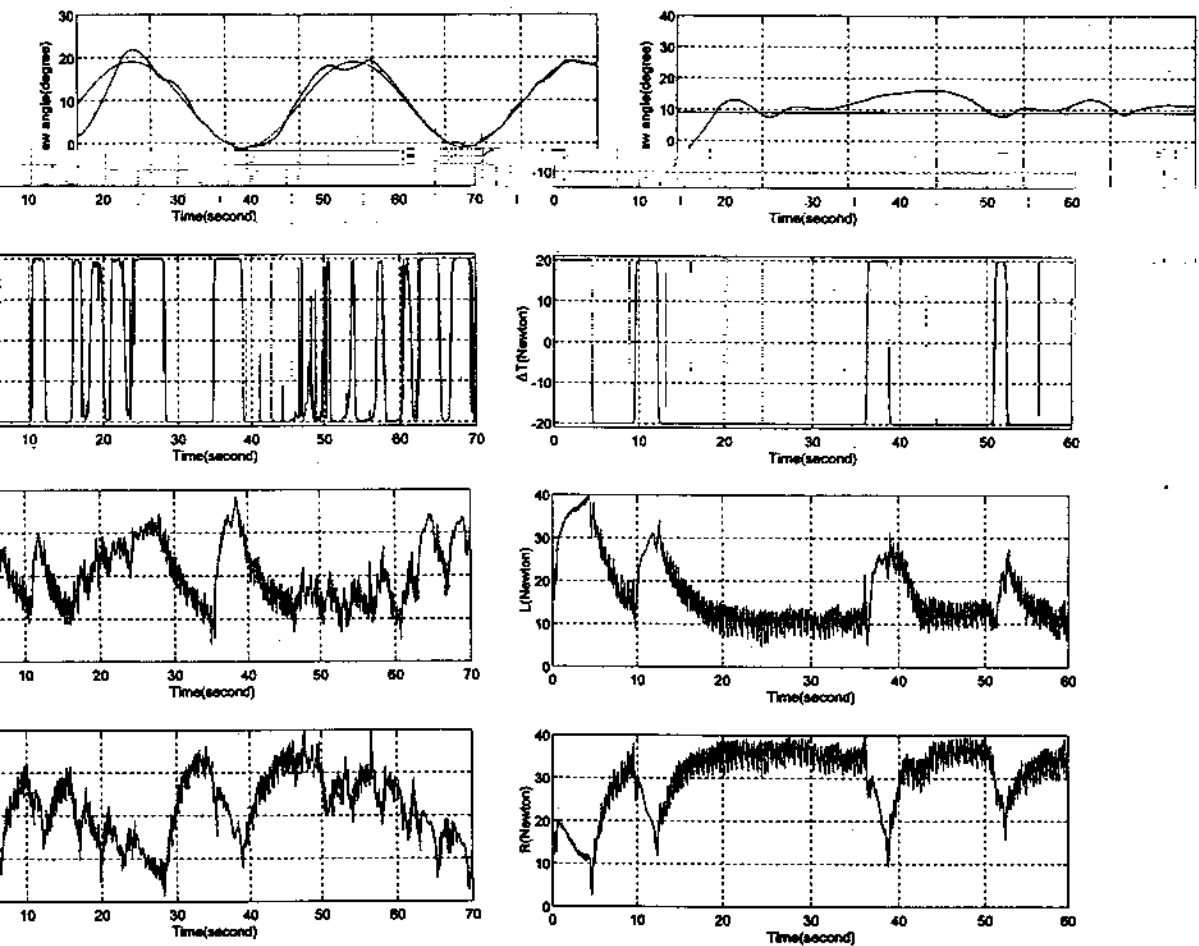


圖10：水下載具試驗機追隨正弦波航向命令之實驗結果

圖11：水下載具試驗機受一固定外力干擾之實驗結果

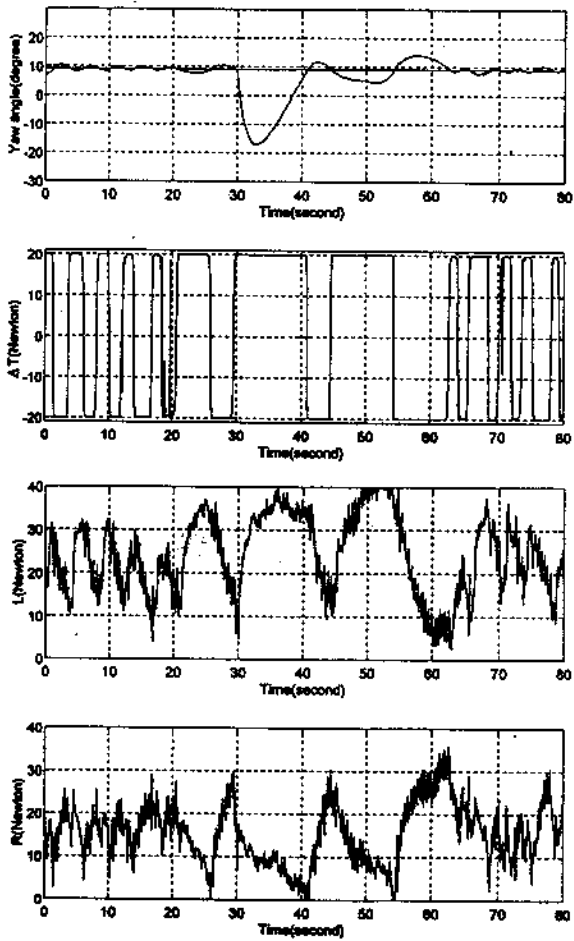


圖12：水下載具受一突然外力干擾之實驗結果

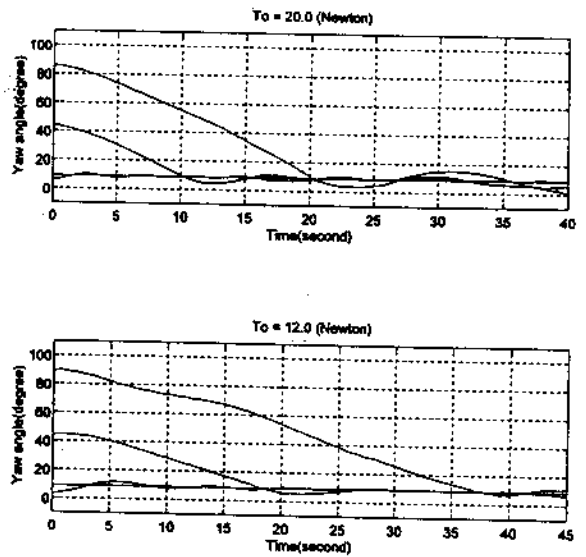


圖13：強健性測試：控制器適應載具動態慢的變化

Adaptive Control of an Autonomous Underwater Vehicle Testbed Using Neural Networks

C.C. Wang¹, J.Guo² and F.C. Chiu³

Abstract

The control of autonomous underwater vehicles has been a challenge to control engineers due to combined non-linear nature of both the vehicle itself and the environment in which they operate. This paper presents an implementation research on the adaptive controller of an autonomous underwater vehicle testbed in which the controller architecture is made using multi-layered neural networks. The problem considered is that of designing a controller for an autonomous underwater vehicle to provide directional control. A flux gate compass is used to measure the yaw angle and yaw rate. Directional control is performed by two thrusters in the horizontal plane. Weight adaptation of the neural network is achieved by minimizing an objective function that is weighted sum of tracking errors and control input rates. According to the experimental tests on various command trajectories, we show that when the learning process is kept active through the control operation, the neural network adapts to time-varying plant dynamics as well as disturbance upsets.

¹ Graduate Student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, National Taiwan University.

² Associate Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, National Taiwan University.

³ Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, National Taiwan University.