

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

船舶穩定翼控制系統設計之研究

STUDY ON THE DESIGN OF CONTROL SYSTEM FOR SHIP STABILIZERS

計畫編號：NSC 90-2611-E-002-026

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：吳聰能 副教授 台灣大學工程科學及海洋工程研究所

共同主持人：陳義男 教授 台灣大學工程科學及海洋工程研究所

一、中文摘要

船舶穩定翼控制系統為一利用調變穩定翼的攻角以獲得所需之力與力矩來達到船舶在波浪中航行時抑制搖晃的裝置，其以大出力之電液伺服系統為驅動力。然因為船上的真實環境較惡劣，訊號傳輸時容易產生電磁的干擾，影響控制系統的可靠度，而且中央控制電腦的效能及穩定性亦影響船舶運動的安全性。

本研究以具高效能及高穩定性之 real-time Linux(為一種即時 UNIX 作業系統)為中央控制電腦的作業平臺，並以 RS-485 做為中央控制電腦與電液伺服系統控制電路間之傳輸介面，取代一般類比訊號傳輸以減少干擾，以對整個控制系統做更安全的考量。另外，針對船舶運動特性，設計一個具有強健性之自組織模糊控制器以適時調變穩定翼之攻角，達到抑制船舶搖晃之效果。最後，再對整個控制系統的軟、硬體作一實船整合測試，以驗證系統之穩定性與可靠度。

關鍵詞：穩定翼、減橫搖、自組織模糊控制、即時系統

Abstract

Ship stabilizers control system is commonly applied to a ship to reduce the rolling and pitching motion when sailing in waves. The stabilizer is high power electro-hydraulic servo system. Due to noises(EMI) of the power system, the stability and efficiency of the control computer for the stabilizer system is critical to the safety of the ship motion.

The real-time Linux operating system and an interface using RS-485 to communicate between the control computer and the electro-hydraulic servo system will be setup. We will also design a

self-organizing fuzzy controller to control the stabilizing fins in real time. Finally, we will test the entire control system by experiments on the ship to prove the effectiveness of the hardware and software.

Keywords: Stabilizers, Anti-rolling, Self-Organizing Fuzzy Control, Real-time Linux

二、緣由與目的

船舶於海上航行時，在風浪的作用之下產生了六個自由度的運動，其中橫搖運動為船舶六向自由度中最擾人的運動之一，當橫搖角度過大時，會導致船員工作效率低落、旅客不舒服、貨物移動碰撞與航行阻力增加等損害。由於船舶本身對橫搖之阻尼能力甚低，因此橫搖運動經常與加諸於船體之波力形成共振，造成甚大的橫搖角度，此對於噸位較小之中、小型船舶，如漁船、渡輪、客輪、軍艦等所產生的影響將特別顯著，因此利用穩定翼來減低橫搖角對船舶就顯得格外需要。

減橫搖穩定翼是裝在接近船艏部兩側水線以下伸出舷外的一對翼形鰭片，當船舶在風浪的作用下產生橫搖運動時，穩定翼系統在控制器的控制之下，根據橫搖情況來調變穩定翼之攻角，使得穩定翼產生減橫搖的力矩，而達到減橫搖的效果，因此，需要多大的力矩以及該如何適時、適量的給予穩定翼攻角命令，亦即如何設計穩定翼及控制器，為抑制海浪造成船舶搖擺之主要關鍵技術。

在國內對於船舶穩定翼的研究曾提出過許多的控制方法，成效亦令人滿意[4][5]。以往在船舶減橫搖控制的研究大都以電腦做模擬，或是在實驗水槽中以縮小之船模做實驗，如此，難免簡化了一些實際上多變的海象、複

雜的船舶運動與忽略了實船的穩定翼系統硬體機構運作情形，或可能發生的訊號傳輸、電磁干擾(Electromagnetic Interference, 簡稱EMI)等問題，對於實際上的應用效果與系統穩定性仍是值得探討的。

本研究很幸運地獲得行政院海岸巡防署海洋巡防總局的支持，能夠在其巡護船『和星艦』(排水量 1700 噸)上作實船的減橫搖實驗，由於穩定翼電控系統需要從駕駛臺到機艙間之長距離佈線，而且船上機艙的實際環境較複雜，主機、發電機等設備都可能對穩定翼電控系統之訊號傳輸產生電磁干擾，若以類比訊號作控制命令的傳遞，難免造成訊號的干擾及衰減；而 EIA RS-485 serial bus 在工業上使用頗多，它是一個半工雙向的平衡式匯流排，可作為一個長距離、高速的數位式訊號傳輸網路，所以為確保系統的可靠度，本文將以 RS-485 bus 為基礎的分散式網路系統，進行遠端數位 I/O 訊號的資料傳送。

而中央控制電腦的穩定性亦影響著整個控制系統的安全性，故本文採用具高度穩定性與多工性的即時 Linux 為中央控制電腦的作業平臺，來增加系統的整體穩定性及提高控制效率，另外可藉由 Linux 作業系統作平行運算處理的多工性優點，將控制電腦與監控台整合在同一部電腦上執行，同時做系統的控制運算與監控，以簡化電腦硬體系統，降低成本，方便駕駛艙空間的佈置。

船舶在航行中所產生的橫搖運動由於諸多因素的影響，例如波頻、船速等，使得橫搖運動方程式具有時變、非線性等特性[6]。因此應用傳統控制器，將難以達到所要求的性能；而目前常被使用的模糊控制器與以往的控制器在設計上的優點為：不用對系統作鑑定(identification, ID)，只需依賴系統的響應即可產生控制信號[7][8]。這無非是一個簡便的控制器設計方式，但不能保證其具有優異的控制性能，因模糊控制器之設計需要藉由專家經驗來訂定模糊規則，就一控制器設計者而言，這些經驗規則並不容易獲得，因此造成模糊控制器在性能要求的設計上產生困難與不理想之處，而往往需要花費大量時間在模糊控制器的規則訂定上，而現代工程上應用之控制器均要求需具備人工智慧、自我學習的功能，以滿足精確的控制要求。近年來，陸續有各種調適控制器參數的學習法則問世，如類神經網路(neural network)的演算法[9]，最廣為被大家所使用的是倒傳遞神經網路(back-propagation network)，使用此法則時，雖然學習精度頗高，但受限於學習樣本，一旦學習樣本更新，則舊的學習樣本極有可能被遺忘，且學習的好壞與

隱藏層神經元的數目、初始加權值及偏權值等均有關，尚缺乏一個系統化的方式來遵循，亦必須以試誤法來為之。因此本文應用另一具有自我學習法則之自組織模糊控制器(Self-Organizing Fuzzy Controller, SOFC) [10]，以便依照系統反應之性能自行修正模糊規則決策表，減少人工方式建立模糊規則表所耗費的時間，且其控制性能亦會隨著規則表改進而達到一定的水準，以確保穩定翼優異的控制性能。

三、系統數學模式

具有穩定翼之船舶，若橫搖角度不大(+10~-10度內)，在波浪中之橫搖運動方程式可表示為如下所示之二階線性微分方程式：

$$a_s \ddot{\theta} + b_s \dot{\theta} + c_s \theta = M \quad \dots\dots(1)$$

其中 M 為船舶所受到的總力矩(total moment)，可表示為：

$$M = M_w + M_f \quad \dots\dots(2)$$

上二式中， θ 為橫搖角度(實際上包含橫移、平擺之耦合效應在內)，

a_s 為虛質量慣性矩係數(virtual mass moment of inertia)，

b_s 為阻尼力矩係數(damping moment coefficient)，

c_s 為回復力矩係數(restoring moment coefficient)(橫搖角不大時，其值根據初穩度公式為 $\Delta \cdot g \cdot \overline{GM}$ [23])。

M_w 為波浪力矩，或稱激盪力矩(exciting moment)。

M_f 為穩定翼所產生的減橫搖力矩(anti-rolling moment)。

其中 a_s 、 b_s 和 c_s 為波長(或波頻)、船速及船形(hull form)的函數。所以當船舶在波浪中航行產生橫搖運動時，由於上述等變因的影響，使得運動方程式中的各項參數並非維持一固定值，而是一時變(time-varying)的參數[23]。也就是說：船舶在不同船速、或波浪遭遇頻率改變時、或吃水不同時，式(2.2.2)中的各個參數也隨之改變。

當水流繞過翼時會產生一水動升力(hydrodynamic lift)，此升力與相對於翼之入射水流流速之平方、升力係數、翼面面積成正比，而一已知翼面之升力係數為攻角(angle of attack)之函數，故翼面所產生的升力與攻角的關係可以下式表示：

$$F_s = \frac{1}{2} \rho S V^2 \cdot C_L(\psi) \quad \dots\dots(3)$$

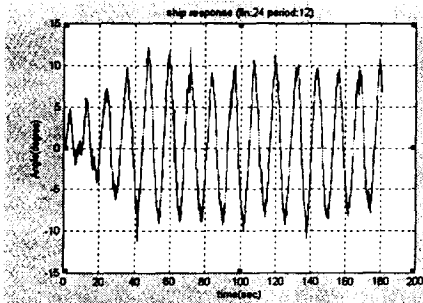
上式中， ρ 為水密度
S 為翼面面積

V 為入射流速
 Ψ 為翼面攻角
 $C_L(\psi)$ 為升力係數

升力係數可以下式表示之:

$$C_L(\psi) = \left(\frac{\partial C_L}{\partial \psi} \right) \cdot \psi \quad \dots\dots(4)$$

本實驗於基隆外海，選擇風浪不大(橫搖角度約在 ± 1.5 度內)的海況下，在船速固定於 14 節(knot)時，將穩定翼作不同週期與不同擺幅之週期性擺動，使船舶產生橫搖運動，藉以分析船舶橫搖之運動特性。其橫搖響應圖如 Fig_1。



Fig_1 週期 12 秒翼角 ± 24 度之橫搖響應

表_1「和星艦」船體主要尺寸

全長(Length over all)	82.3 公尺
船寬(Breadth, moulded)	11.6 公尺
船深(Depth, moulded)	7.2 公尺
設計吃水(Design Draught)	3.9 公尺
排水量 (Displacement)	1700 噸
垂向重心(VCG, from Keel)	5.3 公尺
橫向定傾高(GM)	0.8 公尺
縱向重心(LCG, from FP)	38.9 公尺
橫搖運動慣性半徑	4.1 公尺
縱搖運動慣性半徑	19.4 公尺

四、即時電控系統架構

穩定翼雖然可以抑制船舶的搖晃，但是如果操控翼面作動的主機平台或訊號傳輸的穩定度不佳時，則控制命令將可能發生延遲或不正常之干擾跳動，此時，穩定翼的啟動對於船舶安全將是一大威脅。因此本文嘗試以 real-time Linux 為主機作業平台，以及利用

RS-485 數位式訊號取代一般類比訊號的命令傳遞來抵抗機艙裡嚴重的電磁干擾現象，以增加系統的穩定性與可靠度。

由於船舶運動的控制，取樣頻率不需太大，實際上取樣頻率為 10Hz，此情況下一個週期為 100ms，絕對足夠自組織模糊控制的運算，但是由於在 real-time task 中無法存取週邊設備的緣故，所以角度 sensor 及經由 RS-485 介面卡發送命令這兩部分的程式便以 process 的形式執行。

在控制 sensor 及 RS-485 介面卡即時存取的 real-time task 中，僅作發一命令的動作，實際上和 sensor 及 RS-485 介面卡溝通的 process 則在收到命令後執行命令，因此此部分雖然在 real-time task 中仍為硬即時的方式，但若 sensor 或 RS-485 介面卡有某次存取時間過長，超過一個週期，但由於其以 process 的方式運作，所以並不會造成系統當機。

然經實測結果，sensor 及以 RS-485 介面卡輸出命令的運作也都能在其週期時間內完成。整個系統的軟體規劃可以分成 real-time domain 與 non-real-time domain 兩部份。

在 real-time module 中，一載入便開啓四個 task，其中有三個 task 分別為和 sensor、RS-485 命令輸出及穩定翼角度回授的三個外界 process 溝通，週期性地發命令給 process 驅使其工作，這三個 task 會直到使用者下命令結束程式時才會結束。

另一個在載入 module 時便會啟動的 task，為主要的核心 task，其作用為等待使用者鍵入命令，並聯繫及分派工作給各週邊的 process。在 Linux process 端有一個 keyin 介面程式接收使用者以鍵盤下的指令，簡單分析之後經由 real-time FIFO 傳給此等待命令中的核心 task，核心 task 在分辨命令種類後分別作適當的處理。

例如一個 task 在收到使用者鍵入命令啟動自組織模糊控制時，便會開啓另一個 real-time task，用來讀取 sensor 傳回的 roll 值，而作模糊控制的運算，最後經由 RS-485 介面卡將運算結果傳送給 NuDAM(將 RS-485 數位訊號轉換為類比訊號之裝置)轉換為類比訊號對油壓伺服系統下命令。直到核心 task 收到使用者命令要結束自組織模糊控制時，核心 task 才結束掉作模糊運算的 real-time task。

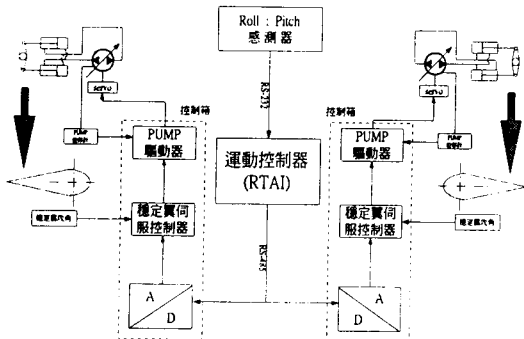
又或者當核心 task 在收到使用者結束程式的命令時，便會先結束掉三個和週邊設備溝通的 task，然後等候程式管理員移除 module 才完全結束程式。

在往後技術成熟時，可能只需分辨自組織模糊控制開始及結束程式的命令，而現在，則由於本論文實船測試安排了許多不同的測試程序以作為實驗分析之用，以致需分辨較多的

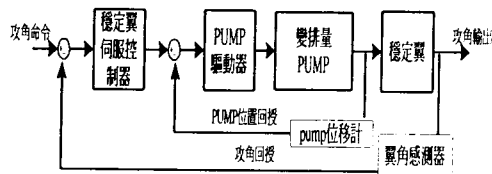
命令，例如儲存各項資料於硬碟中等。

本文的整體電控系統配置如 Fig_2 所示。係採分工控制的方式來操控穩定翼，其中，中央控制電腦(real-time linux OS 即 Fig_2 中的運動控制器部分)負責接受橫搖角度感測器的輸入，再根據船舶的運動特性進而計算出運動控制的輸出量；而穩定翼伺服控制器則獨立地根據由中央控制電腦輸出的命令，對穩定翼系統的液壓驅動裝置做閉迴路的定位控制，如此分散控制權的方式可以使得控制電腦的運算簡單化與快速化，而且對系統的安全性亦有所助益，再者，因為中央控制電腦到控制箱(包括 NuDAM 數位/類比轉換器、穩定翼伺服控制器及 pump 驅動器部分)之間需長距離佈線(駕駛台到機艙間)，因此以 RS-485 數位式訊號為傳輸訊號來減低電磁干擾問題。如此，便能增加系統的穩定性與可靠度，使得控制效率獲得提升。

穩定翼伺服系統的液壓驅動裝置控制流程方塊圖如 Fig_3 所示，可變排量幫浦本身經由驅動器作位置回授控制，加上穩定翼的擺動角度再對穩定翼控制器作攻角的位置回授控制，形成雙回授之閉迴路控制系統。



Fig_2 穩定翼控制系統硬體配置圖



Fig_3 穩定翼液壓驅動裝置控制流程圖

五、自組織模糊控制律設計

自組織模糊控制律即是在原有之基本模糊控制律上加上具有學習能力的自組織部分而成。由於基本模糊控制律於控制規則訂定後，實驗結果常常不合乎我們所期望的，為了達到較好的控制性能，就需要將控制器做一微調工作，在基本模糊控制律設計上，此為相當費時且不便之處。

自組織模糊控制律是採用性能評定決策

表來修正模糊規則達到自我學習的目的；但是在性能評定決策表的規劃上並不比規劃規則表來得容易，而且自組織模糊控制律是以模糊關係矩陣間的運算來修正規則表，雖然適合利用現有之數學工具來進行運算，但是就實際運用上，卻會耗費相當多的記憶體空間及計算時間，並不適合做線上的處理。

因此本文依據文獻[10]提出的自組織模糊控制律的設計法則來設計控制律，避免以上所述之缺點。

將系統動態以 ARMA 模型來表示：

$$X(nT) = P(z^{-1})X(nT-T) + Mu(nT-mT) + Q(z^{-1})u(nT-mT-T) \quad \dots\dots(5)$$

其中：

$$P(z^{-1}) = p_0 + p_1 z^{-1} + \dots + p_{r-1} z^{-(r-1)}$$

$$Q(z^{-1}) = q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{s-m-1} z^{-(s-m-1)}$$

mT : 系統延遲時間

z^{-1} : 後移運算子，

$$z^{-1} X(nT) = X(nT - T)$$

假設系統過去的狀態是保持不變的，則當有一個有別於 $u(nT-mT)$ 的 $u'(nT-mT)$ 輸入時，將會產生一個不同於 $X(nT)$ 的輸出 $X'(nT)$ ，如下式所示：

$$X'(nT) = P(z^{-1})X(nT-T) + Mu'(nT-mT) + Q(z^{-1})u(nT-mT-T) \quad \dots\dots(6)$$

定義 ΔX , Δu 如下：

$$\Delta X = X'(nT) - X(nT)$$

$$\Delta u = u'(nT - mT) - u(nT - mT)$$

由式(4.3.1)與式(4.3.2)兩式相減可得：

$$\Delta X = M\Delta u \quad \dots\dots(7)$$

當 T 趨近於零時，可得下式：

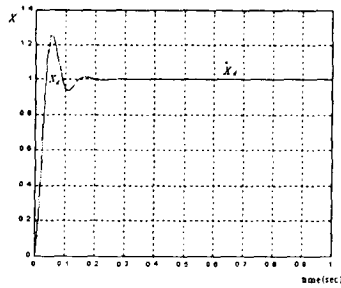
$$\frac{\Delta \dot{X}}{\Delta u} \cong \frac{1}{T} \frac{\Delta X}{\Delta u} \cong \frac{1}{T} M \quad \dots\dots(8)$$

由式(7)及式(8)兩式說明了 ΔX , $\Delta \dot{X}$, Δu 三者間關係，其成立條件為 $\Delta X \approx 0$ 、 $\Delta \dot{X} \approx 0$ ，否則會得到較不正確的 Δu 值。其另一層含意為當輸出 X 、 \dot{X} 分別需要修正量 ΔX 、 $\Delta \dot{X}$ 時，便可由式(7)與式(8)求出輸入的修正量 Δu ，透過輸入的改變來補償輸出的誤差及誤差改變量。然而由 Fig_4 可知一個控制命令 u 往往無法同時滿足 X 趨近於 X_d 、 \dot{X} 趨近於 \dot{X}_d ，在 Fig_4 中 a 點， $X = X_d$ 、 $\Delta X = 0$ ，我們希望 $\Delta u = 0$ ，但因為 $\dot{X} \neq \dot{X}_d$ 、 $\Delta \dot{X} \neq 0$ ，所以我們同時亦希望 $\Delta u \neq 0$ ，因此便無法同時滿足 X 趨近於 X_d 及 \dot{X} 趨近於 \dot{X}_d 之情況，為合理解決此一困難，需要個別來修正 X 及 \dot{X} 。

定義：

Δu_x 為補償 ΔX 所需的修正量

$\Delta u_{\dot{x}}$ 為補償 $\Delta \dot{X}$ 所需的修正量



Fig_4 時域輸出響應圖

由式(7)與式(8)兩式可得：

$$\Delta u_e = \frac{\Delta X}{M} \quad \dots\dots(9)$$

$$\Delta u_{ce} = \frac{T\Delta \dot{X}}{M} \quad \dots\dots(10)$$

取修正量 Δu 為：

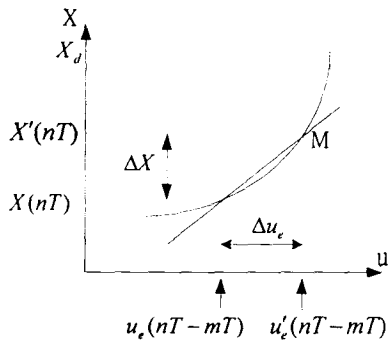
$$\Delta u = (1 - \xi) \Delta u_e + \xi \Delta u_{ce} \quad , \quad 0 \leq \xi \leq 1 \quad \dots\dots(11)$$

其中， ξ 可視為是 Δu_e 與 Δu_{ce} 之間分配的權重值，一般取 0.5。

假設系統的輸出 $X(nT)$ 與輸出設定點 X_d 間有很大的差異，此時希望藉由 u 的輸入使系統輸出 $X'(nT)$ 直接等於 X_d ；但由式(9)知道：

$$M = \frac{\Delta X}{\Delta u_e} = \frac{X'(nT) - X(nT)}{u_e'(nT - mT) - u_e(nT - mT)} \quad \dots\dots(12)$$

成立條件是 $X'(nT) \approx X(nT)$ ，如 Fig_5 所示：



Fig_5 統輸入輸出關係

假設取 $X'(nT) = X_d$ ，則 $X'(nT) \gg X(nT)$ ，將使式(12)無法成立，因此我們將 $X'(nT)$ 取在 $X(nT)$ 與 X_d 之間，避免上述情形，如此可使系統輸出 X 逐漸朝 X_d 接近。取 $X'(nT)$ 為：

$$X'(nT) = (1 - \gamma)X(nT) + \gamma X_d \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad \dots\dots(13)$$

由式(13)可得：

$$\begin{aligned} \Delta X(nT) &= X'(nT) - X(nT) \\ &= \gamma(X_d - X(nT)) \\ &= \gamma e(nT) \quad \dots\dots(14) \end{aligned}$$

同理可得：

$$\begin{aligned} \Delta \dot{X}(nT) &= \dot{X}'(nT) - \dot{X}(nT) \\ &= \gamma(\dot{X}_d - \dot{X}(nT)) \\ &= \gamma \dot{e}(nT) \\ &= \frac{\gamma}{T} ce(nT) \quad \dots\dots(15) \end{aligned}$$

將式(9)、式(10)、式(14)、式(15)代入式(11)可得：

$$\begin{aligned} \Delta u &= (1 - \xi) \Delta u_e + \xi \Delta u_{ce} \\ &= (1 - \xi) \frac{1}{M} \Delta X + \xi \frac{T}{M} \Delta \dot{X} \\ &= \frac{1}{M} (1 - \xi) [\gamma e(nT)] + \frac{T}{M} \xi [\gamma \frac{1}{T} ce(nT)] \\ &= \frac{\gamma}{M} [(1 - \xi) e(nT) + \xi ce(nT)] \quad \dots\dots(16) \end{aligned}$$

上式中 M 值可由系統鑑定中 ARMA 模型中鑑定得知，然而鑑定結果之準確性和穩定性常因許多因素影響而不理想，因此一般將 M 設為常數，而 ξ 可視為是 e 與 ce 間分配的權重值，一般取 $\xi = 0.5$ ，也就是不偏重任何一個變數， γ 為修正強度，我們可藉由改變其值來加速 SOFC 的學習速率，當 γ 太大，規則庫的修正易矯枉過正，造成修正量太大，導致系統命令的大幅變動，使得輸出產生震盪現象；當 γ 太小，學習速率慢，規則庫的修正無法即時補償到輸出，則易造成系統暫態響應不佳，一方面考慮響應要快，震盪不想太大，故一般而言， γ 選擇 0.1 以下的值較為恰當，當取樣頻率愈高， γ 值之選擇宜愈小。

式(16)表示量測誤差 e 及誤差變化量 ce 得到的一個輸出修正量 Δu 。因為輸出量 u 是由規則表推論而得，當系統得到一輸出時，即可由計算求得誤差和誤差變化量的明確值，此明確值對應到模糊集合 E, CE 的論域上，E 和 CE 將各激發兩個模組，即一次可激發出四條規則，如 Fig_6 所示。如前所述，控制命令 $u(nT - mT)$ ，應該對取樣時間 nT 時的不良輸出性能負責，換句話說每一條規則的修正量 Δu_i 應該與其被激發的強度 w_i 成正比。因此我們可令：

$$\Delta u_i = kw_i$$

其中 k 為一待求之加權值，由解模糊化之重心推論法：

$$u = \frac{\sum_i A(w_i) u_i}{\sum_j A(w_j)}$$

每一取樣瞬間規則被激發強度 w_i 相同，可得：

$$\Delta u = \frac{\sum_{i=1}^4 A(w_i) \Delta u_i}{\sum A(w_i)} = \frac{\sum_{i=1}^4 (A(w_i) \times kw_i)}{\sum A(w_i)} = k \frac{\sum_{i=1}^4 A(w_i) \times w_i}{\sum A(w_i)}$$

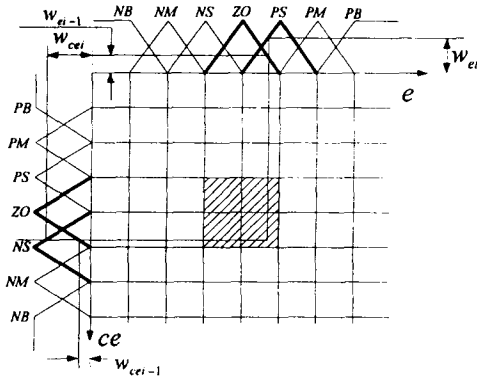
上式改寫為：

$$k = \frac{\sum_{i=1}^4 A_i}{\sum_{i=1}^4 (w_i \times A_i)} \Delta u$$

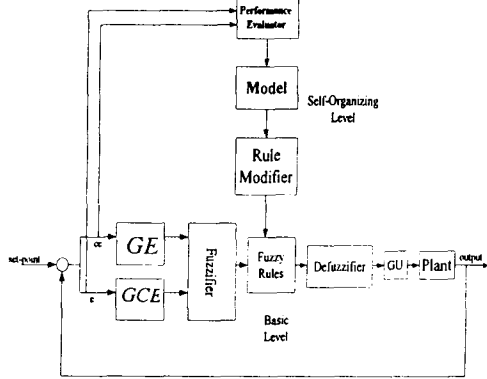
就第 i 條規則的輸出而言：

$$\begin{aligned} u_i(nT+T) &= u_i(nT) + \Delta u_i \\ &= u_i(nT) + kw_i \\ &= u_i(nT) + w_i \frac{\sum_{i=1}^4 A_i}{\sum_{i=1}^4 (w_i \times A_i)} \frac{\gamma}{M} [(1-\xi)e(nT) + \xi ce(nT)] \end{aligned} \quad \dots\dots(17)$$

上式即為 SOFC 規則表修正後的輸出值。



Fig_6 規則表激發之模組示意圖
整個自組織模糊控制律架構如 Fig_7 所示。



Fig_7 自組織模糊控制律架構圖

由於從船舶橫搖感測器接受命令，到穩定翼升力形成的過程中需要一段時間，所以為達到船舶減橫搖的效果，我們希望橫搖角度的變化率(CE)比橫搖角度(E)的反應來得敏感，使得穩定翼升力及早形成，以抗衡波浪對船所造成的搖晃；而我們又不希望小角度(約 0~1.5 度)橫搖時穩定翼產生作動，造成太大的作動頻率，而影響機構的壽命與液壓伺服系統能源上的不必要浪費，故本文的模糊論域分割乃採非等間距分割的三角形隸屬度函數。及在模糊規則表初值的設定上給予中間 9 個矩陣元素設計為零，如此，當學習速率設得不大(0.1 以

下)時，即使有修正量的改變亦不致於造成太大的變動，如表 2 所示。

表 2 模糊規則表初值設定

Ece	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
NM	PB	PB	PB	PB	PM	PS	PS
NS	PB	PB	ZO	ZO	ZO	ZO	NS
ZO	PM	PM	ZO	ZO	ZO	NM	NM
PS	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	NB	NB
PM	NS	NS	NM	NB	NB	NB	NB
PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

六、計算機模擬

由推導出的船舶運動模式，及所設計的控制律，我們可先以計算機進行模擬測試，來驗證及測試其性能與可行性，今針對幾個重要的變因加以考慮，以比較控制器在各種變因存在情況下所具有之強健性能。本文考慮的變因如下：

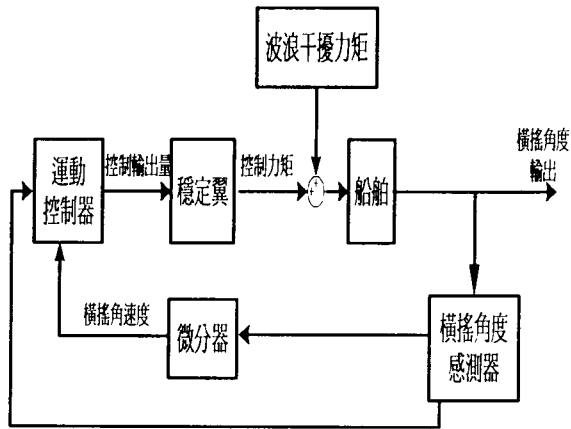
1. 參數變動：由於第二章所推導出的運動方程式為一近似值，且實際上此參數具有時變性，所以本文將設計兩組不同的參數來進行模擬，如下所示，以分析控制器的性能。

$$\begin{aligned} (1) \quad & a_s = a_s - a_s * 2\%; \\ & b_s = b_s + b_s * 1\%; \\ & c_s = c_s + c_s * 3\%; \\ (2) \quad & a_s = a_s + a_s * 2\%; \\ & b_s = b_s - b_s * 1\%; \\ & c_s = c_s - c_s * 3\%; \end{aligned}$$

2. 船速變動：由於穩定翼的升力為船速平方的函數，見式(3)，於是設計三種船速，也就是令船舶前進速度為 12 節(knot)、14 節(knot)與 16 節(knot)來模擬，比較船速不同時穩定翼所產生的減橫搖效率(roll-reduction efficiency, R.E.)。減橫搖效率 R.E. 定義如下式：

$$R.E. = \left(1 - \frac{\text{stabilized roll amplitude (RMS)}}{\text{unstabilized roll amplitude (RMS)}} \right) \times 100\% \quad \dots\dots(18)$$

另外，因為橫搖感測器易受船舶甲板振動而可能受到雜訊的干擾，所以在模擬條件中我們均加入高頻的微小振動干擾，以及考慮實際上穩定翼升力的形成時間會有延遲，所以我們也在模擬條件中估算考慮此延遲時間以配合實際上可能的情況。整個運動控制流程如 Fig_8 所示。



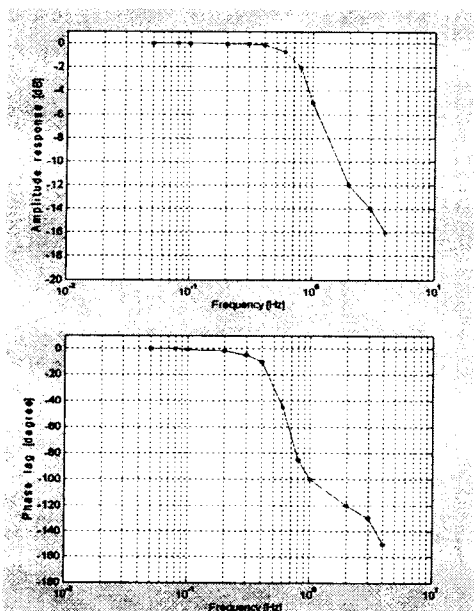
Fig_8 船舶運動控制方塊圖

在整個模擬過程中，狀態回授之取樣頻率 (sampling rate) 設定為 10Hz。穩定翼的最大攻角為 32 度。而運動控制器中的參數為估計實際船舶橫搖特性分別設定為： $G_e=0.1$ 、 $G_{ce}=10$ ，至於學習速率 γ 則因為考慮液壓伺服系統的頻寬不大(如 Fig_9 所示)所以將其設定在 $\gamma=0.005$ ，以避免機器本身產生振動。

最後對於外在干擾(external disturbances)，也是模擬波浪產生的激盪力矩(exciting moment)，假設為一規則波型式：

$$M_w = M_a \sin(2\pi\omega_e t)$$

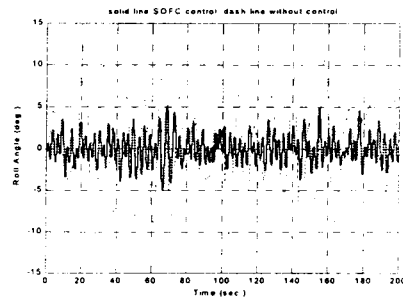
其中，振幅 $M_a = 60000[N-M]$ ，遭遇頻率 $\omega_e = 0.0833 [Hz]$ ，與一隨機產生之不規則波型式。



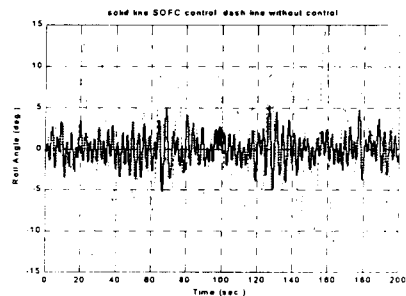
Fig_9 液壓伺服系統頻率響應圖

	船速	系統參數	波浪干擾
A	12	$a_s = a_s$ $b_s = b_s$ $c_s = c_s$	Random Wave
B	12	$a_s = a_s - a_s * 2\%$; $b_s = b_s + b_s * 1\%$; $c_s = c_s + c_s * 3\%$;	
C	12	$a_s = a_s + a_s * 2\%$; $b_s = b_s - b_s * 1\%$; $c_s = c_s - c_s * 3\%$;	

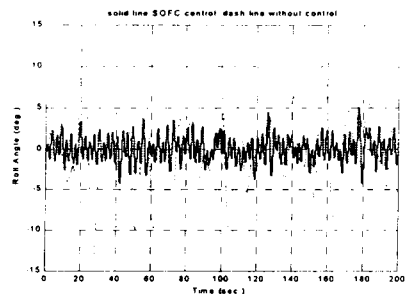
表 3 模擬項目與模擬狀況表



Fig_10 模擬項目(A)之橫搖響應



Fig_11 模擬項目(B)之橫搖響應



Fig_12 模擬項目(C)之橫搖響應

七、實驗與分析

7.1 實驗說明

(1)控制律：

於實驗過程中配合實際船舶動態響應調整比例因子 G_e 、 G_{ce} 的值，使其與實際物理特性相符，以增進控制器的控制效果。

(2)海域之選擇：

實驗時選擇基隆外海一海況平均之海域，以進行控制效果之測試。實驗當日浪高約為 5 公尺，陣風約 7 級。

(3)實驗步驟：

以選定之海域進行往返航行，一趟約十分鐘，將時間分為三段，分別為前後 150 秒無控制行為，而中間 300 秒為有控制行為，以分析控制之效果，而且於往返過程中調整適當之控制器比例因子參數，以調整、測試控制效果。

7.2 實驗結果分析與討論

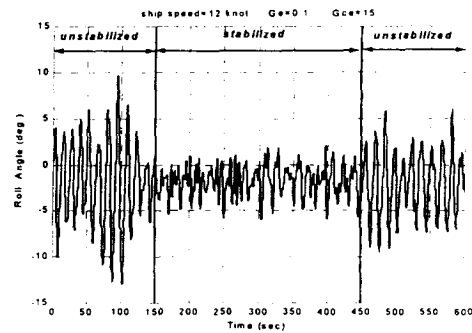
Fig_13、Fig_15 及 Fig_16 分別為船速 12 節、14 節及 16 節之下的控制結果比較。Fig_14 為取 Fig_13 之控制效果明顯之時間區段放大，以及此段時間內穩定翼相對之擺動情形。

由實驗結果可知：當船速加快，造成穩定翼升力增加時，控制器的增益值應調小，才不致使其反應過度造成些許反效果。由 Fig_16 可知：若控制器增益值調整不當時，控制效果將不佳，但是因為自組織模糊控制器具有自我學習的功能，所以儘管控制參數選擇不當，控制效果還是會漸漸增加的，只是如果時間太短的話，學習修正的效果仍然有限，除非硬體設備能夠適應快速的學習速率(如頻寬夠大)，才適合將學習速率增加(本文由於已由 Fig_9 知液壓伺服系統之頻寬不高，所以並未將學習速率作增加的測試，以免損壞液壓伺服系統)，否則比例因子的選擇最好不要差太多，所以 Fig_16 於控制開始後的前一段時間效果並不佳，直到一段時間後才有變好的趨勢，以致整體效果評估仍不如預期的好(以 300 秒控制區間的控制效率而言)。

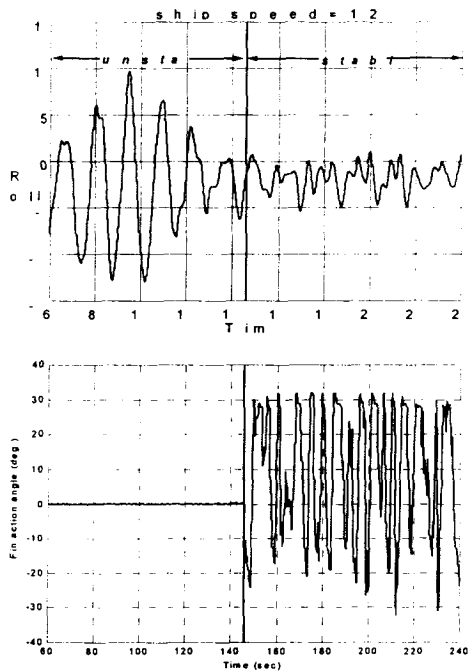
由於控制過程中產生升力矩與波浪力矩相抗衡的情況，以致於在控制段的橫搖響應中有小幅的高頻振盪情形發生，但振幅均不大。

由實驗結果顯示了 SOFC 實際上具有不錯的性能，若將 Fig_13、Fig_15 與 Fig_16 的橫搖角度分別以三段不同時間區段，分別取其均方根 (root mean square) 值，再以式(18)計算其減搖效率，其結果分別為：Fig_13 為 67%、Fig_15 為 64%與 Fig_16 為 43%。由於在三種不同船速下實驗時，船舶於無控制下之橫搖角不等(船速 12 節時之平均橫搖角>船速 14 節時之平均橫搖角>船速 16 節時之平均橫搖角)並無

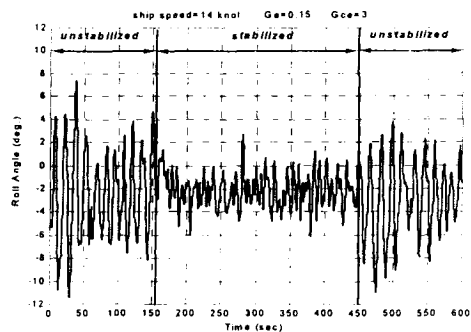
法如模擬般給予相同的背景條件，且穩定翼本身的控制精度有限，所以此三個實驗結果所呈現之減橫搖效率並不能僅以船速為依據而作比較。



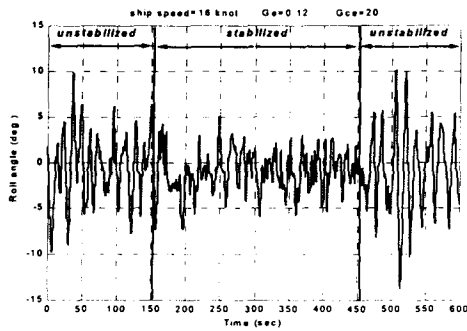
Fig_13 船速 12 節時之橫搖響應圖



Fig_14 船速 12 節時之橫搖響應與相應之穩定翼作動角



Fig_15 船速 14 節時之橫搖響應圖



Fig_16 船速 16 節時之橫搖響應圖

八、結論

- (1) 本文針對穩定翼控制系統，採用了抗干擾之 RS-485 數位式傳輸電路。實際應用上確實沒有因於電磁干擾之環境下而造成訊號傳輸之不穩定干擾現象，使得整個控制系統的可靠度獲得提升。
- (2) 由實驗結果驗證出自組織模糊控制器於減橫搖控制之適用性與其效果，而且因為控制器本身具有自我學習修正的功能，所以其參數的設定不一定要具有很高的準確亦可得到不錯的控制效果，而且當船體橫搖特性改變時，控制效果亦不會差太多，顯示出其優越的強健性能。

九、參考文獻

- [1] Abkowitz, M.A., "The Effect of Antipitching on Ship Motions", Trans. SNAME Vol.67, pp.210-252, 1959.
- [2] Jin, Hongzhang "Semi-simulation of ship roll reducing effectiveness by a fin stabilizer." Harbin Shipbuilding Engineering Inst, Harbin, China. Model Simul Control, pp.55-64, 1989.
- [3] A.E.Baitis, T.R.Applebee, W.G.Meyers. "U.S. Coast Guard 270-ft Medium Endurance Class Cutter Fin Stabilizer Performance. "David W.Taylor Naval Ship Research and Development Center, Bethesda, MD.Ship Performance Dept. (MECHANICAL, INDUSTRIAL, CIVIL, & MARINE ENGINEERING) Marine engineering; (OCEAN TECHNOLOGY AND ENGINEERING) Marine engineering Oct.1985.
- [4] Y.H.Liou, W.C.Chen, T.N.Wu, J.H.Guo, "Self-Tuning Double Fuzzy Logic Controllers Applied to the Ship Stabilization Fin System", 8th Conference on Automation, Vol.2, pp.929-937, 1995.
- [5] 劉益宏, "以遺傳演算法設計之最佳化滑動模式模糊控制器應用於船舶減縱搖之控制" 國立台灣大學碩士論文, 1995。
- [6] A.R.J.M.Lloyd, "Seakeeping: ship behavior in rough weather", Senior Principle Scientific Officer, 1989.
- [7] 楊英魁, "FUZZY 控制", 中國生產力中心技術引進服務組, 全華圖書, 1991。
- [8] 王進德, 蕭大全, "類神經網路與模糊控制理論入門", 全華圖書, 1994。
- [9] Bart Kosko, "Neural Networks and Fuzzy Systems", Prentice-Hall, 1992.
- [10] 楊清任, "即時語意式自組織模糊控制器之設計", 國立台灣大學碩士論文, 1992。
- [11] 徐中康, "應用以類神經網路為結構之滑動模式模糊控制器於液壓缸驅動力控制之研究", 國立台灣大學碩士論文, 1992。
- [12] L.A.Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", IEEE Transactions on Systems, man, and Cybernetics, vol.SMC-3, No.1, pp.28-44, 1973.
- [13] C.T Lin and C.S. George Lee, "Neural Fuzzy System" Prentice Hall, 1996.
- [14] 吳柏熹, "高響應比例閥應用於材料疲勞試驗機力控制之研究", 國立台灣大學碩士論文, 2000。
- [15] 詹玉麒, "快速熱處理之即時模擬器與控制系統", 國立交通大學碩士論文, 2000。
- [16] Matt Welsh, Dalheimer & Kaufman, "Running Linux, 3/e", O'REILLY, 1999.
- [17] Mike Loukides & Andy Oram, "Programming with GNU Software", O'REILLY, 1998.
- [18] Real-Time Linux, <http://www.rtlinux.org/>.
- [19] Real-Time Application Interface, <http://www.rtai.com>.
- [20] <http://linuxfab.cx>
- [21] Fossen T. I., "Guidance and control of ocean vehicles", John & Wiley, Sons Ltd, 1994.
- [22] 戴堯天, 劉衿友, 陸磐安, "造船原理", 國立臺灣大學造船工程學研究所, 1975。
- [23] 陸磐安, "造船原理-船舶動力學", 國立編譯館主編, 1999。