

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

自適應控制應用於船舶穩定翼控制系統之設計研究

STUDY ON THE DESIGN OF CONTROL SYSTEM FOR SHIP STABILIZERS USING SELF-ADAPTIVE CONTROL METHOD

計畫編號：NSC 91-2611-E-002-014

執行期限：91年8月1日至92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學系

共同主持人：陳義男 教授 台灣大學工程科學及海洋工程學系

一、中文摘要

船體在波浪中之運動可視為六個自由度之剛體運動，其中與船舶航行安全、舒適性及穩定性關係較為密切者，當屬橫搖運動。因此為提高船舶之耐航性及舒適度，常藉由穩定翼產生左右兩舷之升力，以抗衡波浪干擾所產生的力矩而達到穩定的效果。本研究的目的即為設計控制器，控制穩定翼適時的擺動，以有效抑制船舶的橫搖運動。

本文首先建立 1700 噸巡邏艦的橫搖數學模式與穩定翼伺服系統的模型，用來設計模糊控制器。以模擬的方式，在不同的船速與波浪干擾下，比較運動控制器的強健性，並進行實船測試，驗證控制器的性能。結果顯示：實船實驗所得到的結果與數值模擬所得到的結果相當吻合，證明控制器的可行性。

關鍵詞：穩定翼、減橫搖、模糊控制、強健性

Abstract

Ship motion in waves can be treated as rigid body motion with six degree of freedom. Especially the rolling mode has direct effect on seaworthiness, operation capability and personal comfort. In order to reduce the wave-induced rolling motion, fin stabilizers are best for evenly matching with the moment of force caused by waves. Subject of the study is to design stabilizing fin controllers to reduce the wave-induced rolling swing.

In the study, a roll mathematical model and a model of fin hydraulic system has been built for a 1700 tons patrol vessel. We design a fuzzy controller according to the above mathematical models to test the controller by simulating operations in different conditions, like wave disturbances, noise and speed. Finally, we experience our controller in real 1700 tons patrol vessel to test the system's robustness. No matter simulation or on-site experiment, the result shows

that fuzzy controller is excellent in control performance.

Keywords: Stabilizers, Anti-rolling, Fuzzy Control, Robustness

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艙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。

穩定翼最早是在 1923 年由日本的元良信太郎設計，並裝於“陸丸”，實船試驗獲得良好的效果，平均減搖效果 70% 左右。後來日本三菱造船有限公司將此技術轉移給英國的丹尼-布朗兄弟公司(Denny-Brown Co.)，穩定翼是屬於主動式減搖裝置，其構造主要包括翼、翼角傳動裝置、控制系統等部份。穩定翼為各種減搖裝置中效果最佳的一種，效果最好可達 90% 左右，例如，1958 年英國“瑪莉皇后號

(Queen Marry) 在大風浪條件下進行了減搖性能的試驗。當穩定翼運作時，船的橫搖角平均 2 度左右，而不作動時，橫搖角約 25 度，可見有相當的減搖效果。

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，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。常見的穩定翼控制器設計方法，可歸納為傳統式方法與非傳統式方法。其中傳統式的有 PID 控制法 [12]，結合 LQR 及參數化虛輸出變數，以達成最佳極點定位之最佳控制法 [13]，以及利用 H-Infinity 控制達到較佳強健性之控制器 [14]。非傳統式控制器設計法則有擷取專家經驗 [15][16]，建立模糊規則之模糊控制器，以及利用遺傳演算法決定最佳歸屬函數形狀之智慧型控制 [17][18]。近來對於穩定翼控制系統的設計，有針對系統不確定性 (model uncertainty)，採用穩定度補償方法 (Stability Augmentation System) [19]，與操作點評估法 (operation point stimator) [19][20]。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，只需依賴系統的響應即可產生控制信號。這無非是一個簡便的控制器設計方式，因模糊控制器之設計僅須藉由人類經驗法則來訂定模糊規則，不需要受控系統的數學模型，是一種直接且有效的方法。並且在工業界都有很好的成效，因此本文以模糊控制理論為基礎，設計控制器於行政院海岸巡防署之「和星艦」的減橫搖控制，進行實驗分析。

穩定翼翼面形狀及面積大小直接關係穩定翼扶正能力，船舶航行於海上受波浪等作用，橫搖為不規則振盪形態，如何適時調整翼面轉動角度，提供適當的扶正力矩，為穩定翼是否能抑制橫搖的關鍵，因此，其運動控制器，成為影響減橫搖效率的主要因素之一。即

為本文研究的目標。

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(1)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，其橫搖響應圖如圖 1。

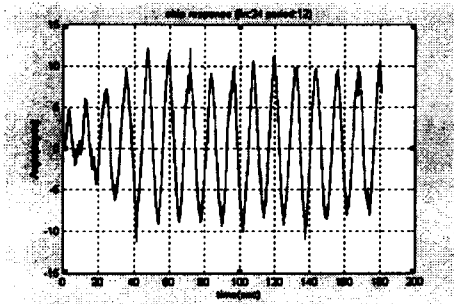


圖 1 週期 12 秒翼角±24 度之橫搖響應

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、液壓伺服系統

靜液壓傳動系統在上世紀初就已存在，由於具有多樣性、容易控制與單位重量的出力大之特性而廣泛的被採用。靜液壓傳動系統中的液壓泵與液壓馬達是能量轉換的裝置，泵先將電動機轉動的機械能轉換為的液壓能，傳給液壓馬達，液壓馬達再將液壓能轉換為轉動的機械能，帶動負載，故靜液壓傳動系統是一流體變速器。泵與液壓馬達依所用機構的不同，可分為螺旋式、齒輪式、輪葉式與柱塞式。由於柱塞式的泵與液壓馬達同時具有低洩漏與可變排量之特性，一般靜液壓傳動系統大都採用之。

泵與液壓馬達組合而成的靜液壓傳動系統可依泵、液壓馬達之排量的可否改變而分為定排量泵驅動定排量液壓馬達(PFMP)、定排量泵驅動變排量液壓馬達(PFMV)、變排量泵驅動定排量液壓馬達(PVMF)以及變排量泵驅動變

排量液壓馬達(PVMV)四型；此四型靜液壓傳動系統皆為流量耦合裝置，也就是泵排出的流量等於流入液壓馬達的流量。

「和星艦」穩定翼液壓伺服系統的迴路如圖 2 所示，其為泵控液壓伺服系統。圖中的變排量泵由電動馬達驅動，泵的輸出流量直接驅動穩定翼機構，輸出流量的大小與方向由泵內部的斜盤位置來控制。而決定泵斜盤位置的排量控制機構由放大器、線性差分位置感測器(LVDT)、伺服閥與液壓缸所組成，為一個小型的液壓位置伺服機構。

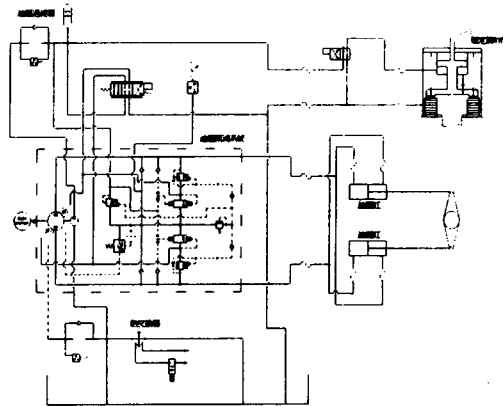


圖 2 穩定翼液壓迴路

變排量泵排量控制機構：

在構造上泵排量控制機構是由放大器、伺服閥、液壓缸與線性差分位置感測器所組成。其運作原理為機構內的伺服閥控制液壓缸的位置，使泵內部的斜盤角度改變，進而控制泵的輸出流量與方向。

由於泵的排量控制機構之響應比系統的響應快了許多，故可將泵的排量控制機構以一階元件描述，即

$$\frac{D_p(s)}{V_p(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \quad (5)$$

式中

D_p ：泵浦排量。

V_p ：泵浦排量控制機構之輸入電壓。

K_p ：泵浦排量控制機構之轉換增益值。

τ_p ：泵浦量控制機構之時間常數。

管路：

為了使管路的動愈方程式足夠簡潔，在列寫泵、液壓缸間的流量方程式時，作了以下幾點假設：

泵與液壓缸間的連接管路很短，可以忽略管路中的壓力損失和管路動態；也就是管路兩端的壓力相同。

泵與液壓缸的內、外洩漏為層流，與壓差成正比。

不考慮高壓管路的壓力超過安全閥的開啓壓力之情形。

不考慮管路中高低壓力的轉變。同忽略低壓管路中的補油壓力。

首先推導上管路的方程式，流入管路中的油流減去流出管路的油流，等於被壓縮的量，即

$$Q_p + Q_{ch1} - Q_{r1} - Q_{fm} = \frac{V}{\beta} \dot{P}_1 \quad (6)$$

此處

V ：上管路與泵浦出口油室至液壓缸入口油室的總壓縮體積。

β ：液壓油約有效體積彈性模數(effective bulk modulus)。

Q_p ：泵浦的實際輸出流量。

Q_{r1} ：上管路溢流閥流出的流量。

Q_{ch1} ：補油泵對上管路流入的流量。

Q_{fm} ：穩定翼液壓缸所消耗的流量。

其中

$$Q_p = D_p N_p - C_{pi}(P_1 - P_2) - C_{pe} P_1 \quad (7)$$

D_p ：泵浦的排量。

N_p ：泵浦的轉速。

C_{pi} ：泵浦的內漏係數。

C_{pe} ：泵浦的外漏係數。

P_1 ：上管路壓力。

P_2 ：下管路壓力。

Q_{r1} 為上管路溢流閥溢出的流量，因為溢流閥的動態特性比負載的動態特性快了許多，為了簡化系統的數學模式，僅僅考慮溢流閥的靜態特性，當上管路的壓力 P_1 大於溢流閥的開啓壓力 P_{c1} 時，由力量的平衡關係可得

$$(P_1 - P_{c1})A = K_s X \quad (8)$$

A ：溢流閥有效作用面積。

K_s ：彈簧常數。

X ：溢流閥閥軸移動距離。

溢流閥溢出的流量可由節流口方程式得知，即

$$Q_{r1} = KX \sqrt{P_1 - P_{ch}} \quad (9)$$

此處

$$K = C_d W \sqrt{2I\rho}$$

C_d ：流量係數。

W ：面積梯度。

ρ ：液壓油密度。

P_{ch} ：補油泵設定壓力。

故可得

$$Q_{r1} = K_{r1}(P_1 - P_{c1})\sqrt{P_1 - P_{ch}} \quad \text{if } P_1 > P_{c1}$$

$$Q_{r1} = 0 \quad \text{if } P_1 < P_{c1}$$

在此不考慮補油泵、補油泵止回閥和補油泵壓力設定溢流閥的動態特性，只是當管路壓力低於補油泵的設定壓力 P_{ch} ，補油泵即開始向管路補充油流 Q_{ch1} ，令其等於補油泵的設定壓力。

下管路的狀態如同上管路的考慮，流入管路中的油流減去流出的油流，等於被壓縮的量，即

$$Q_{fm} - Q_p + Q_{ch2} - Q_{r2} = \frac{V}{\beta} \dot{P}_2 \quad (10)$$

其中

$$Q_{r2} = K_{r2}(P_2 - P_{c2})\sqrt{P_2 - P_{ch}} \quad \text{if } P_2 > P_{c2}$$

$$Q_{r2} = 0 \quad \text{if } P_2 < P_{c2}$$

穩定翼機構：

由兩組液壓缸與轉動機構組成，在此將其視爲雙桿缸

$$\text{其中： } A_F = A + A_{Rod}$$

由牛頓第二運動定律可得穩定翼液壓缸與負載的運動方程式

$$(P_1 - P_2)A_F = M_F \ddot{X} + B_F \dot{X} + C_F X + F_r \quad (11)$$

A_F ：液壓缸受力面積。

M_F ：液壓缸與負載的慣性力。

B_F ：黏性阻尼係數。

X ：液壓缸的位移。

F_r ：摩擦力。

參數鑑定：[29][33]

在此處用於模擬的系統參數值有些可以直接從廠商技術手冊中得知或量測得到，有些則必須藉由參數鑑定的技巧來獲得。

穩定翼擺動時，主要須克服負載慣性力、黏性阻尼力與摩擦力，因此，本文分別給予系統，不同頻率，振幅及無負載下，來得到所需的鑑定值。

由以上的方法，雖可獲得部分的參值，但是仍有一些參數值，如液壓油的體積彈性係數，因其值甚易受到油質劣化、空氣混入等因素而有所變化；另外一些參數如洩漏係數，尤其溢流閥不易量得其特性，因此本論文中係將模擬系統的響應曲線與實驗所得的曲線比較，利用數值最佳化理論搜尋這些參數值，使得兩者的誤差爲最小。

表 2 液壓伺服系統參數值

參數	參數值
泵浦的外漏係數	$7.71 \cdot 10^{-13} \text{ m}^4/(\text{kg}\cdot\text{sec})$
泵浦的內漏係數	$4.62 \cdot 10^{-13} \text{ m}^4/(\text{kg}\cdot\text{sec})$
轉換增益 K_p	$1.24 \cdot 10^{-2} \text{ }^{\wedge}3/(\text{rad}\cdot\text{vot})$
上管路溢流閥設定壓力	138 kg/cm^2
下管路溢流閥設定壓力	89 kg/cm^2
補油泵設定壓力	4.2 kg/cm^2
總壓縮體積	0.00025 m^3
液壓油有效體積彈性模數	$2.04 \cdot 10^8 \text{ kg}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$
時間常數	0.05 sec
液壓缸負載慣量	98.1 kgm
液壓缸阻尼力	394 $\text{kgm}\cdot\text{m}^2/\text{sec}$
液壓缸面積	$1.65 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

五、模糊控制器設計

在傳統的控制領域裡，控制系統動態模式的精確與否是影響控制優劣的最主要關鍵，系統動態的資訊越詳細，則越能達到精確控制的目的。然而，對於複雜的系統，由於變數太多，往往難以正確的描述系統的動態，於是工程師便利用各種方法來簡化系統動態，以達成控制的目的，但卻不盡理想。換言之，傳統的控制理論對於明確系統有強而有力的控制能力，但對於過於複雜或難以精確描述的系統，則顯得無能為力了。因此便嘗試著以模糊數學來處理這些控制問題

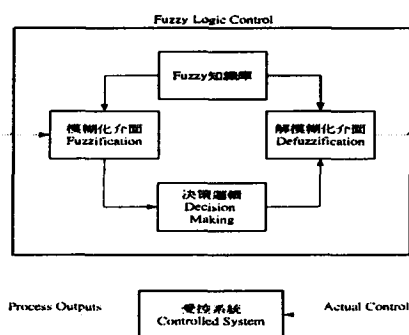


圖 3 模糊控制架構圖

圖 3 為一般模糊控制系統的架構，此架構包含了五個主要部份，即：定義變數、模糊化、知識庫、邏輯判斷及解模糊化，底下將就每一部份做簡單的說明：

定義變數：也就是決定程序被觀察的狀況

及考慮控制的動作，例如在一般控制問題上，輸入變數有輸出誤差 E 與輸出誤差之變化率 CE ，而控制變數則為下一個狀態之輸入 U 。其中 E 、 CE 、 U 統稱為模糊變數。

(2)模糊化：將輸入值以適當的比例轉換到論域的數值，利用口語化變數來描述測量物理量的過程，依適合的語言值(Linguistic value)求該值相對之隸屬度，此口語化變數我們稱之為模糊子集合(Fuzzy subsets)。

(3)知識庫：包括資料庫(database)與規則庫(rulebase)兩部份，其中資料庫是提供處理模糊數據之相關定義，而規則庫則藉由一群語言控制規則描述控制目標和策略。

(4)邏輯判斷：模仿人類下判斷時的模糊概念，運用模糊邏輯和模糊推論法進行推論，而得到模糊控制訊號。此部份是模糊控制器的精髓所在。

(5)解模糊化：將推論所得到的模糊值轉換為明確的控制訊號，做為系統的輸入值。變數選擇與論域分割：

控制變數的選擇要能夠具有系統特性，而控制變數選擇是否正確，對系統的性能將有很大的影響。例如做位置控制時，系統輸出與設定值的誤差量即可當做模糊控制器的輸入變數。一般而言，可選用系統輸出、輸出變化量、輸出誤差、輸出誤差變化量及輸出誤差量總和等，做為模糊控制器的語言變數，而如何選擇，則有賴於工程師對於系統的瞭解和專業知識而定。因此，經驗和工程知識在選擇控制變數時佔有相當重要的角色。

當控制變數確定之後，接下來就是根據經驗寫出控制規則，但是在做成模糊控制規則之前，首先必需對模糊控制器的輸入變數和輸出變數空間做模糊分割。

模糊分割時各領域間重疊的程度大大地影響控制的性能；一般而言，模糊集合重疊的程度並沒有明確的決定方法，大都依靠模擬和實驗的調整來決定分割方式。重疊的部份意味著模糊控制規則間模糊的程度，因此模糊分割是模糊控制的重要特徵。

隸屬度函數的型式

Dr.Mamdani 最初所使用的模糊變數分為連續型和離散型兩種型式，因比隸屬度函數的型式也可以分為連續型與離散型兩種。由於語言變數及相對應隸屬度函數的選擇，將造成多種不同的模糊控制器架構；因此，底下將對各種隸屬度函數的型式加以介紹：

1.連續型隸屬度函數

模糊控制器中常見的連續型隸屬度函數有下列三種：

吊鐘形：隸屬度函數可表示如下：

$$\mu(x) = e^{-\frac{1}{w}(x-a)^2} \quad (12)$$

三角形：隸屬度函數可表示如下：

$$\mu(x) = \frac{1}{W} (-|x - a| + W) \quad (13)$$

梯形：隸屬度函數之表示法和三角形相類似。

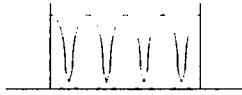
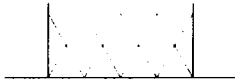


圖 4 隸屬度函數 吊鐘型



行船隸屬度函數 三角形



圖 6 隸屬度函數 梯型

在式中參數 a 為隸屬度函數中隸屬度為 1 時的 x 值，參數 W 為隸屬度函數涵蓋論域寬窄的程度。而圖中 NB、NS、ZO、PS、PB 等是論域中模糊集合的標記(label)，其意義如下所示：

- NB：負方向大的偏差(Negative Big)
- NS：負方向小的偏差(Negative Small)
- ZO：近於零的偏差(Zero)
- PS：正方向小的偏差(Positive Small)
- PB：正方向大的偏差(Positive Big)

圖上將模糊集合之全集加以正規化為區間 $[-1,1]$ ，在模糊控制上，使用標準化的模糊變數，其全集也常正規化，這時之正規化常數(亦稱為增益常數)，也是在設計模糊控制器時必須決定的重要參數。

本文在此，使用兩個輸入變數，分別為角度與角速度，輸出變量為翼角位置，歸屬函數則為了方便計算，使用三角形的歸屬度函數，並且將輸入的變量，分為七個模糊論域，如圖 7 與圖 8，在輸出的選擇，則使用了五個模糊論域，如圖 9。

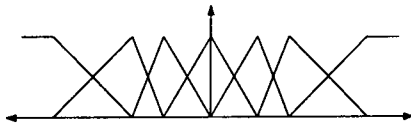


圖 7 輸入變數 E 之歸屬度函數

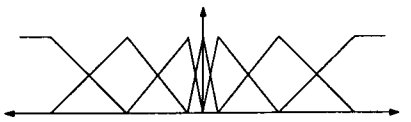


圖 8 輸入變數 CE 之歸屬度函數

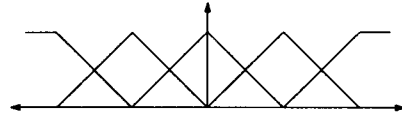


圖 9 輸出變數 U 之歸屬度函數

模糊控制規則：

控制規則是模糊控制器的核心，規則的正確與否直接影響控制器的性能，而規則數目的多寡也是一個重要因素，因此底下將對控制規則做進一步的探討。

模糊控制規則的取得可經由下列各種方式：

(1) 專家的經驗和知識

專家的經驗和知識是設計上有力的線索。人類日常生活中判斷事情時，使用語言定性分析多於數值定量分析；而模糊控制規則提供了一個自然的架構來描述人類行為及決策分析，並且專家的知識通常可用 if...then 的型式來表示。

藉由詢問經驗豐富的專家，在獲得系統的知識後，將知識改為 if...then 的型式，則如此便可構成模糊控制規則。為了獲得最佳的系統性能，仍需多次使用試誤法，以修正模糊控制規則。

(2) 操作員的操作模式

專家巧妙地操作複雜的控制對象(plant)，但要將專家的訣竅加以邏輯化並不容易；因此，在控制上也要考慮技巧的獲得。在許多工業系統無法以一般的控制理論做正確的控制，但是熟練的操作員在沒有數學模式下，也能夠成功地控制這些系統；因此，記錄操作員的操作模式，並將其整理為 if...then 的型式，則構成控制規則。

(3) 學習

為了改善模糊控制器的性能，必須讓它具有自我學習或自我組織的能力，使得模糊控制器能依設定的目標，增加或修改模糊控制規則。

模糊控制規則的型式：

模糊控制規則的型式主要可分為二種：

(1) 狀態評估模糊控制規則

狀態評估(state evaluation)模糊控制規則為類似人類約直覺思考，所以大多數的模糊控制器都使用這種模糊控制規則，其型式如下：

$$R_i : \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{in} \text{ then } y \text{ is } C_i$$

其中 x_1, x_2, \dots, x_n 及 y 為語言變數(linguistic variables)或稱模糊變數，代表系統的狀態和控制變數； $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{in}$ 及 C_i 為語言值(linguistic value)，代表論域中的模糊集合。其次還有另一種表示法，是將後件部改為系統

狀態變數的函數，其型式如下：

$$R_i : \text{if } (U \text{ is } C_i \rightarrow (x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i)) \text{ then } U \text{ is } C_i$$

(2)目標評估模糊控制規則

目標評估(object evaluation)模糊控制規則能夠評估控制目標，並且預測未來控制信號，其型式如下：

$$R_i : \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \dots \text{and } x_n \text{ is } A_{in} \text{ then } y = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

決定模糊控制規則的流程：

實際應用模糊控制時；最初的問題是控制器的設計，即如何設計模糊控制法則，但到目前為止尚未有像傳統的控制理論一樣，能藉由一套發展完整的理論推導來設計，其設計概念將於此簡單介紹。

圖 10 所示為單輸入和單輸出之是步階響應圖，若使用狀態評估模糊控制規則的型式，前件部變數為輸出的誤差 E 和相同取樣週期內的變化量 CE ，後件部變數為控制器輸出量 U 之變化量 CU 則誤差、誤差變化量及控制輸出變化量之表示式為：

$$E_n = R - Y_n \quad (14)$$

$$CE_n = E_n - E_{n-1} = Y_{n-1} - Y_n \quad (15)$$

$$CU = U_n - U_{n-1} \quad (16)$$

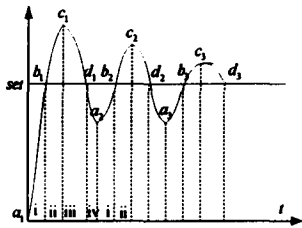


圖 10 動態系統之步階響應圖

其中 E 表誤差， R 表設定值(set point)， Y 表系統輸出， U 表控制輸出，下標 n 表在時刻 n 時的狀態。由此可知，誤差變化量 CE 是隨輸出 Y 的斜率的符號變號，當輸出上升時， $CE < 0$ ，下降時 $CE > 0$ 。

設計模糊控制規則時，是在所設想控制對象各階段之反應，記述採取那一種控制比較好；首先選擇各階段的特徵點，記錄在模糊控制規則的前件部，然後思考在該點採取的動作，記錄在模糊控制規則的後件部。如圖 11 中，在第一循環之 a_1 點附近，誤差為正且大，但誤差變化量幾乎是零，可以記為“ E is PB and CE is ZO”在此點附近需要很大的控制輸出，記為“ CU is PB”，同樣地，對於 b_1 、 c_1 、 d_1 等的附近，可分別得到如下的控制規則：

$$a_1 : \text{If } E \text{ is PB and } CE \text{ is ZO then } CU \text{ is PB}$$

$$b_1 : \text{If } E \text{ is ZO and } CE \text{ is NB then } CU \text{ is NB}$$

$$c_1 : \text{If } E \text{ is NB and } CE \text{ is ZO then } CU \text{ is NB}$$

$$d_1 : \text{If } E \text{ is ZO and } CE \text{ is PB then } CU \text{ is PB}$$

在第二循環之的 a_2 、 b_2 等之附近，其 E 和 CE 的絕對值比 a_1 、 b_1 點中之值相對減少，所以其 CU 值相對地也較小，其控制規則如下：

$$a_2 : \text{If } E \text{ is PM and } CE \text{ is ZO then } CU \text{ is PM}$$

$$b_2 : \text{If } E \text{ is ZO and } CE \text{ is NM then } CU \text{ is NM}$$

表 3 為依上述程序所構成的 13 條控制規則，其中縱列為 E 值，橫列為 CE 值，表中所列之值為控制輸出變化量 CU 值。由表 4 可知規則數最多可為 49 條，表 3 只使用了其中 13 條控制規則，設計者可依實際需要自行加減規則之數量，以改善系統之響應。

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

表 3 模糊規則表

模糊推論及解模糊化

模糊控制理論發展至今，模糊推論的方法大致可分為三種，第一種推論法是依據模糊關係的合成法則，第二種推論法是依據模糊邏輯的推論法簡化而成，第三種推論法和第一種相類似，只是其後件部份改由一般的線性式組成的。模糊推論大都採用三段論法，可表示如下：

條件命題：if x is A then y is B

事實： x is A'

結論： y is B'

表示法中的條件命題相當於模糊控制中的模糊控制規則，前件部和後件部的關係，可以用模糊關係式來表達；至於推論演算，則是將模糊關係和模糊集合 A' 進行合成演算，得到模糊集合 B' 。推論演算法可以下式表示：

$$B' = A' \circ R \quad (17)$$

若前件部為含有多個命題時，則可表示如下：

條件命題：If x_1 is A_1 .. and x_n is A_n then y is B

事實： x is A'_1 and ... and x_n is A'_n

結論： y is B'

這種模糊推論法其前件部用“and”連結各命題，推論演算的過程則以模糊邏輯來結合前件部中各命題的模糊集合，故前件部的模糊集

合 A 可表示如下:

$$A = A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \bigcap_i A_i \quad (18)$$

由(18)式可得到模糊集合 A 和後件部的模糊集合 B ，利用模糊關係 R 的定義來求得條件命題的模糊關係，其隸屬度函數可用 $\mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n, y)$ 來表示。同樣地，事實部份的模糊集合 A' ，亦可表為:

$$A' = \bigcap_i A'_i \quad (19)$$

因此，以合成演算法可得到推論結果如下:

$$\mu_{B'}(y) = \mu_{A'}(x) \circ \mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n, y) \quad (20)$$

其中

$$\mu_{A'}(x) = \wedge_i (\mu_{A'_i}(x_1) \wedge \mu_{A'_i}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{A'_i}(x_n))$$

針對第一種推論法做介紹:

為 Dr.Mamdani 最初所使用的方法，其所用的控制規則如下所述:

$$R_1: \text{if } x_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{1n} \text{ then } y_1 \text{ is } B_1$$

$$R_2: \text{if } x_1 \text{ is } A_{21} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{2n} \text{ then } y_2 \text{ is } B_2$$

$$R_m: \text{if } x_1 \text{ is } A_{m1} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{mn} \text{ then } y_m \text{ is } B_m$$

其中 A_{ij} ， B_i 代表論域中的模糊集合。若使用模糊關係 R_c 和最大-最小合成的模糊推論，則推論結果可得到模糊集合 B'_i 的隸屬度函數為:

$$\mu_{B'}(y) = \vee_i \{ \mu_{A_{i1}}(x_1) \wedge \mu_{A_{i2}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{A_{in}}(x_n) \wedge \mu_{R_i}(x_1, x_2, \dots, x_n, y) \} \quad (21)$$

其中 $\mu_{R_i}(x_1, x_2, \dots, x_n, y) = \mu_{A_{i1}}(x_1) \wedge \mu_{A_{i2}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{A_{in}}(x_n) \wedge \mu_{B_i}(y)$

當 A'_{ij} 為單集 (singleton) x_j 時，則其隸屬度函數為:

$$\mu_{A'_{ij}}(x_j) = \begin{cases} 1, & x_j = x_j \\ 0, & x_j \neq x_j \end{cases}$$

$$\mu_{R_i} = (\mu_{A_{i1}}(x_1) \wedge \mu_{A_{i2}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{A_{in}}(x_n)) \wedge \mu_{B_i}(y) \quad (22)$$

$$= \wedge_j (\mu_{A_{ij}}(x_j)) \wedge \mu_{B_i}(y)$$

(22)式中， $\wedge_j (\mu_{A_{ij}}(x_j))$ 的值稱為前件部的適合度，因此藉由各條件命題的前件部，便可得到各條模糊規則相對應的適合度。

在實行模糊控制時，將許多條適用的規則，進行上述的推論演算，然後結合各個由演算法，得到的推論結果，來獲得模糊集合 B' 。

解模糊化

在實行模糊控制時，將許多控制規則進行上述推論演算，然後結合各個由演算，得到的推論結果，來獲得控制輸出；為了求得受控系統的輸出，必須將模糊集合 B' 解模糊化，在此將對三種常用解模糊化的方法做簡單的介紹:

(1)重心法

為模糊控制中最常用的方法，其定義為:

$$y^* = \frac{\int \mu_{B'}(y) y dy}{\int \mu_{B'}(y) dy} \quad (23)$$

其中相當於模糊控制集合 B' 重心位置，

(2)高度法

亦為時常使用之解模糊化的方法之一，其定義為:

$$y^* = \frac{\sum \omega_i y_i}{\sum \omega_i} \quad \omega_i = \prod_j \mu_{A_{ij}}(x_j) \quad (24)$$

(3)面積法

與重心法相類似，其定義為:

$$y^* = \frac{\sum S_i y_i}{\sum S_i} \quad S_i = \int \mu_{B'}(y) dy \quad (25)$$

表 4 完整模糊控制規則表

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. 波浪干擾: 船舶航行於海上，海況是具有時變性，因此本文設計三種不同頻率的波浪干擾來進行模擬，分別為 0.05Hz、0.075Hz、0.10Hz、0.125Hz 以及 0.15Hz，在此分別使用正弦波與波浪干擾模型，是由一組白雜訊 (white noise) $w(S)$ ，通過一整型濾波器 (shaping filter)，以模擬實際海浪干擾，本文所使用的整型濾波器 $H(S)$ 如式(26)

$$H(S) = \frac{K_w S}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \quad (26)$$

2. 船速變動: 由於穩定翼的升力為船速平方的函數，於是設計三種船速，也就是令船舶前進速度為 14 節(knots)、16 節(knots)與 20 節(knots)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:

$$R.E. = \left(1 - \frac{\text{stabilized roll amplitude (RMS)}}{\text{unstabilized roll amplitude (RMS)}} \right) \times 100\% \quad (27)$$

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圖 11 所示。

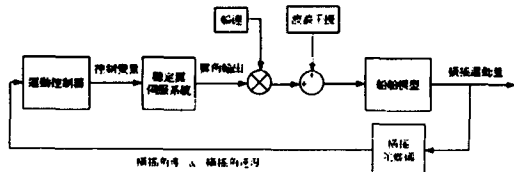


圖 11 船舶運動控制方塊圖

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： $G_e=0.1$ 、 $G_{ce}=0.3$ 代入模擬系統，以求得橫搖響應。

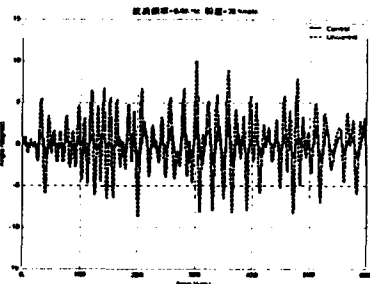


圖 12 波浪頻率=0.05Hz 船速=20 Knots

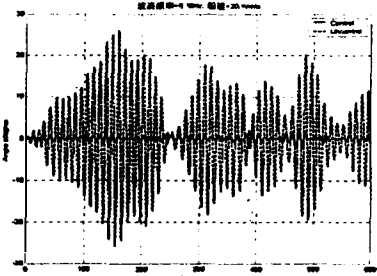


圖 13 波浪頻率=0.10Hz 船速=20 Knots

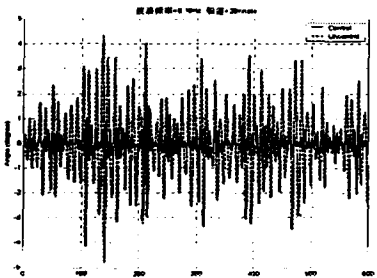


圖 14 波浪頻率=0.15Hz 船速=20 Knots

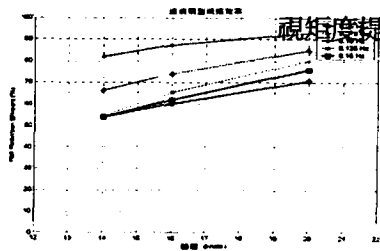


圖 15 船速與減搖效率

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 1~2 公尺。

(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

圖 16、圖 17、圖 18 分別為不同船速下的橫搖動態響應圖，其船速分別為 14 Knots、16 Knots、18 Knots。

控制命令的輸出值，應當隨著船速的減少而增加，以達到在所有的航行速度之下，能夠達成所要求的減搖效率。在實驗結果中，我們可以得到，模糊控制器在「和星艦」上的運用，顯示了不錯的控制效果，由圖 16、圖 17、圖 18 觀察得到，能夠將橫搖運動量抑制在 2 度以內，符合北大西洋公約組織(NATO)的載台運動反應振幅限制基準，而減搖效率也維持在 50%~60%。

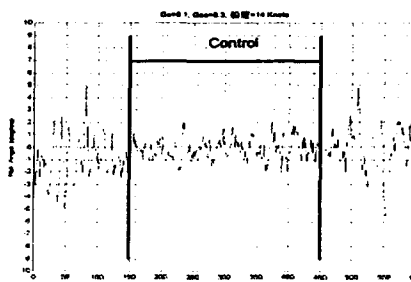


圖 16 $G_e=0.1$ $G_{ce}=0.3$ 船速=14 Knots 橫搖響應

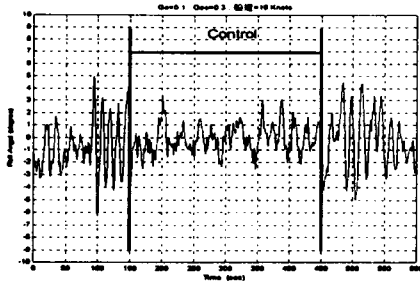


圖 17 $G_e=0.1$ $G_{ce}=0.3$ 船速=16 Knots 減搖響應

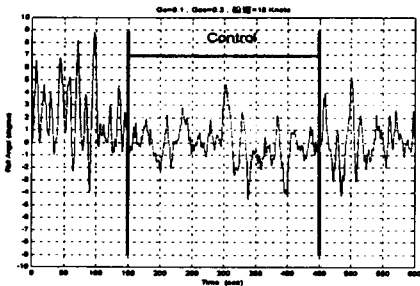


圖 18 $G_e=0.1$ $G_{ce}=0.3$ 船速=18 Knots 橫搖響應

八、結論

本文針對『和星艦』的減橫搖穩定翼系統，設計一個以模糊理論為出發點的模糊控制器，首先以模擬方式分析控制器的性能，最後在實船上驗證控制器的性能。由於波浪力為一動態形式的外力，故無法達到完全抑制橫搖的要求，只能期望所設計的控制系統盡可能的降低橫搖角度，以提高船上人員的舒適性。由本文的研究結果，獲得以下的結論：

- (1) 穩定翼的作用，確實可以減少船舶的橫搖運動量，且隨著速度提高其效果越明顯，此乃因船速越快穩定翼升力越大，所提供的抑制橫搖力矩也越大的結果。
- (2) 所設計的減橫搖穩定翼控制器，在實船上測試，有很好的減搖效果，驗證理論預測與實驗結果一致。在長時間的航行測試過程中，控制系統也展現了其強健性，可作為減橫搖穩定翼控制器的良好選擇。

九、參考文獻

[1] Lloyd, A.R.J.M., "Seakeeping : Ship Behavior in Rough Weather," Ellis Horwood Ltd., Chichester, U.K., (1989).
 [2] Yuji Koike, Masanori Imazeki, Aiichiro Saeki, Hiroaki Miyabe, Masao Mutaguchi, Seiya Yamashit, "Application of Hybrid Anti-Rolling System to Actual Ship" 日本造船學會論文集，第 185 號. pp.111-117, (1999).

[3] 陳信文，"船舶被動式減橫搖艙設計與試驗研究"，國立台灣大學造船及海洋工程研究所，碩士論文，1996。

[4] Daniel A. Liut, Owen F. Hughes, Dean T. Mook, "Control of Rolling in Ships by Means of Active Fins Governed by a Fuzzy-Logic Controller", Journal of Ship Research, Vol.45 ,No. 4, Dec.2001, pp.279-288.

[5] Lloyd, A.R.J.M., "Roll Stabilizer Fins: A Design Procedure," The Royal Institution of Naval Architects , Vol.116, pp.223-254, (1974).

[6] 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.

[7] Sharif, M.T., G.N. Roberts, and R. Sutton, "Final Experimental Results of Full Scale Fin/Rudder Roll Stabilization Sea Trials," Proceedings, IFAC 3th Control Conference on Control in Application in Marine Systems, Trondheim, Norway, pp. 247-254, (1995).

[8] Yang C and M. Blanke, "Rudder-Roll Damping Controller Design Using μ Synthesis," Proceedings ,IFAC 4th Conference on Control Applications in Marine Systems, Fukuoka, Japan pp.127-132, (1998).

[9] Abkowitz, M. A., "The Effect of Antipitching Fins on Ship Motions", Trans. SNAME Vol.67 , pp.210-252, (1959).

[10] 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).

[11] Ching-Taw Tzeng, "Fin Stabilization Controller Design with Saturation and Slew Rate Limitation Actuator", Institution of Maritime Technology, National Taiwan Ocean University, Keelung Taiwan, R.O.C., (1999).

[12] Broome, D.R. and N.R. Elias, "Integrated Control of Ship Roll and Yaw Motion," Transaction of the Institute of Measurement and Control, Vol.1 ,No.3 ,pp.171-175, (1979).

[13] 黎明高，"船體運動中橫搖與平擺去耦合設計法"，國立台灣海洋大學航運技術研究所，碩士論文，(1991)。

[14] Hickey, N.A., M.J. Grimble, M. Johnson, R. Katebi, and D. Wood, "H-infinity Fin Roll Stabilization Control System Design," Proceedings, IFAC 3th Conference on Control Application in Marine Systems, Trondheim, Norway, pp.304-311, (1995).

[15] Sutton, R., G.N. Roberts and S.R. Dearden, "Design Study of Fuzzy Controller for Ship Roll

Stabilization,"Electrnics and Communication Engineering Journal, July/August Issue,pp.159-166,(1989).

[16] 陳深祥,"船舶穩定翼控制系統設計之研究",國立台灣大學造船及海洋工程學研究所,碩士論文,(2000).

[17] Hsueh, W.J. and H.L. Jean,"Genetic Algorithms for the Controller Design of Stabilizing Fins,"Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.180, pp.653-661,(1996).

[18] 簡弘倫,"應用遺傳演算法於智慧型穩定翼控制之研究",國立台灣大學造船及海洋工程學研究所,碩士論文,(1995).

[19] 聯合船舶設計發展中心,"運動控制系統分析(一)(二),船舶技術發展四年計畫",經濟部八十八~八十九年度科技發展專案,(1996).

[20] 王信博,周顯光,臬中興,倪志文,"以逆動態及操作點估測的方法設計船舶穩定控制器,"第十二屆中國造船暨輪機工程學會暨國科會成果發表會論文集, pp.563-571,(1999).

[21] Fossen T.I., "Guidance and Control of Ocean Vehicles", John & Wiley ,Sons Ltd.,(1994).

[22] 戴堯天,劉衿友,陸馨安,"造船原理",國立臺灣大學造船工程學研究所,(1975).

[23] 陸馨安,"造船原理：船舶靜力學", 國立編譯館主編. ,(1999).

[24] 陸馨安,"造船原理：船舶動力學", 國立編譯館主編. ,(1999).

[25] 范尚雍,"船舶操縱性",國防工業出版社,(1988).

[26] D. McCLOY, H.R.Martin,"Control of Fluid Power : Analysis and Design",Ellis Horwood Ltd.,(1980).

[27] John Watton ,"Fluid Power Systems", Prentice Hall,(1989).

[28] 张志星,"Matlab 程式設計與應用",清蔚科技股份有限公司,(2000).

[29] 韓曾晉,"適應控制系統",科技圖書股份有限公司,(1992).

[30] Benjamin C. Kuo. "Automatic Control System", Prentice Hall,New Jersey USA,(1991).

[31] 孫宗瀛,楊英魁,"Fuzzy 控制：理論、實作與應用",全華科技圖書,(1997).

[32] 王琮右," H_{∞} 控制於電液負載感測系統之研究",國立台灣科技大學工程技術研究所,碩士論文,(2000).

[33] 任衍墨,"液壓傳動系統之強韌性最佳控制",國立工業技術學院機械工程研究所,博士論文,(1995).

[34] 廖方裕,"模糊控制應用於船舶之航向控制",NTU-NAOE Tech. Report 483,(1995).

[35] J.S.Roger Jang, Ned Gulley, "Fuzzy Logic Toolbox",The Math Works,(1995).

[36] Guanrong Chen, Trung Tat

Pham ,"Introduction to : Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems", CRC Ltd.,(2000).