

自主式水下載具海域搜尋

路徑控制之研究

郭振華¹ 邱逢琛² 林楨博³ 王傑智³

摘要

本文建立自主式水下載具海域搜尋時路徑控制之能力，結合航向控制器及導航器，完成載具平面直線路徑及路徑變換之位置控制。航向控制的方法是以類神經網路為架構，線上調整控制器之權重值；導航方法則是依據載具之位置追蹤誤差修正航向，以達到路徑控制之目的。最後並以實驗驗證此路徑控制方法之性能及其限制。

Trajectory Control of an Autonomous Underwater Vehicle for Underwater Mapping Tasks

Guo Jenhwa¹ Forng-Chen Chiu² Jen-Bo Lin³ Chieh-Chih Wang³

ABSTRACT

Under the influences of steady or time-varying external disturbances, the primary guidance system of an autonomous underwater vehicle is necessary to generate heading or turning rate commands to guide the vehicle to move through a sequences of way points. In this paper, we use a steering controller which is based on a neural network structure to maintain the vehicle's heading. Then a line-of-sight guidance law which delivers heading commands directly proportional to the line-of-sight angle between vehicle position and the desired way-point position. Experimental results show that the stability of linear path-keeping is related to the separation distance of the consecutive way-points. The experimental results also demonstrated that the stability of the scheme while performing track-changing is also related to the way-point separation.

1. 前言

自主式水下載具 (Autonomous Underwater Vehicle; AUV) 其意指「無需外部控制而能依自有規範行動」的無人潛航器。由於沒有外部的人工操作，因此自主式水下載具需要一套良好的自主式控制系統，能適應如洋流、海底地形等海下作業之未知情況，達到如巡航，搜尋目標等任務之要求。本

1. 國立臺灣大學造船及海洋工程學系副教授
2. 國立臺灣大學造船及海洋工程學系教授
3. 國立臺灣大學造船及海洋工程學系研究助理

文研究對象為自主式水下載具「海敏一號」海域搜尋所需之路徑控制系統，以建立載具執行搜尋任務的基本功能。

2. 海域搜尋相關問題

本節就搜尋的相關問題做簡介，包括環境特性、載具性能、導航考慮、路徑規劃等。

1. 搜尋地區的特性

一般如果在淺水區，且聲納探測的距離足夠時，可採 2-D 的搜尋法；在較深的海域，或聲納探測距離不夠大時，則需要施行 3-D 的搜尋，3-D 的搜尋法可增加深海搜尋的彈性，而 AUV 重要的功能之一就是能夠在靠近海底處作業。

2 自主式水下載具性能的考慮

(1) 深度：一般軍事上用來偵測水雷之最大深度約 400 公尺，海洋資源研究則要求載具有更為嚴格之耐水深規格。

(2) 速度：目前自主式水下載具的速度均在 10 節以下，這樣的速度會影響大面積地區的搜尋。

(3) 續航力：一般自主式水下載具的續航力均在 24 小時以下，目前「海敏一號」之續航力約為 6 小時。

3. 導航的考慮

自主式水下載具首要之量測值就是本身的定位資訊，由載具的位置，可以得知目標物及障礙物的位置。現行採用的導航設備大致可以分為以下三種：

(1) 慣性導航：經由慣性力的量測元件得到運動體的運動資訊，如加速度、速度等，可推求得到載具的位置 [1]。

(2) 外部定位：利用長基線定位聲標，透過幾何運算可精確估出載具位置 [2]。

(3) 環境定位：利用聲納、視訊等所得之環境影像，透過影像處理，特徵萃取後可以得到載具與目標物、障礙物的相對位置 [3]。

4 搜尋與路徑規劃的方法

載具的任務是要完整搜尋整個區域，因此搜尋方法必需能以有效率的方法達成任務。搜尋策略往往依任務而定，不同的任務而有不同的搜尋方式：

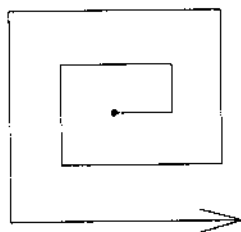
(1) 展開式搜尋：此法是把載具放在最可能發現目標物的地點，然後由內往外擴展搜尋出去。

(2) 指定路徑搜尋：此法用於希望載具依循特定路徑到達特定點之任務，如海底電纜之檢修等。

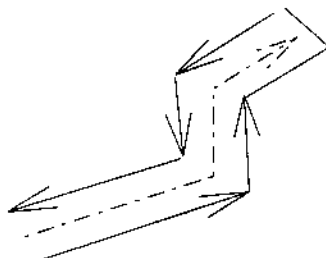
(3) 地毯式搜尋：此法在目標位置區域做均勻的搜尋路徑規劃，適用於大範圍搜尋。

圖 1 所示為上述三類搜尋路徑之示意圖。由於載具體積相對於搜尋範圍可以視為一個點，所以合理之路徑規劃多為直線路徑，而少有劇烈變化之路徑。

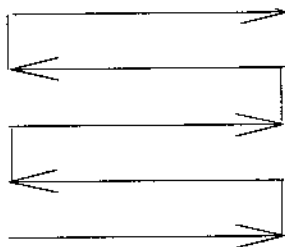
從上述的載具搜尋路徑種類，可知載具所必需具備的基礎控制的能力為：一、直線前進，如圖 2 所示。二、路徑變換，如圖 3 所示。



(a)展開式搜尋



(b)指定路徑搜尋



(c)地毯式搜尋

圖 1 海域搜尋路徑規劃種類

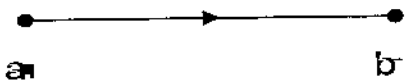


圖 2 直線路徑

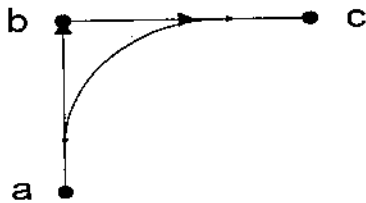
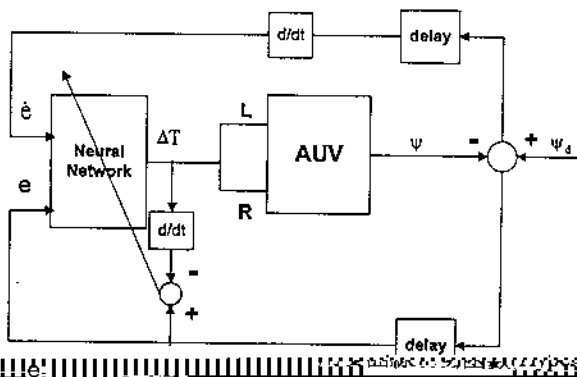


圖 3 直線路徑變換

本文將針對這兩種路徑做控制，以建立「海敏一號」基本路徑控制能力。而在搜尋路徑規劃上，則將所有的路徑切分成上述兩種之組合，分別以直線路徑、直線路徑變換之模式加以控制。

3. 控制器之設計

本文採用一多層正向傳遞網路(Forward Network)做為水下載具的航向控制器。其加權值的更新乃採倒傳遞演算法(Backpropagation Algorithm)。[5,6]



控制系統的架構如圖 4。 ψ 表示水下載具的航向角，與目標航向角 ψ_d 之差，即航向角的追隨誤差。此誤差與其微分直為類神經網路的輸入。選取類神經網路的加權值，其更新乃使用航向角追隨誤差及輸出之變化率，經由一能量函數(Energy Function)之最佳化過程來調整。從類神經網路輸出者為推力差 ΔT ，利用此推力差，以達到航向角的改變。

類神經網路的設計，可分為以下三個部份來討論：

(1) 網路大小與控制頻率

類神經網路架構由一個輸入層，一個隱藏層和一個輸出層組成，輸入層有兩個處理單元，而在隱藏層上則選用五個處理單元，至於輸出層則有一個處理單元。網路大小之決定因素有幾個要件：a. 必需能在控制頻率內做完運算。受限於導航聲納的接收頻率，設定之控制頻率為 0.5 秒。b. 必需能適切表達輸入、輸出之間的動態關係。這部份可以利用水下載具操控運動數值模擬系統做測試前之評估，並且以實驗證實其性能和穩定性。[7]

取樣頻率的決定，主要受到聲納系統回授資料的時間間隔之限制。因取樣頻率的大小會影響到控制的穩定性，一般而言，聲納感測器回授資料的頻率無法任意調整，因此處理資料及類神經網路演算的時間必須儘量減少，此可藉由減少網路層數、處理單元數目、或訓練次數來達到。

(2) 類神經網路的參數

網路的重要參數有學習速率(Learning Rate)、學習次數和轉換函數。

a. 學習速率

過大和過小的學習速率對控制而言都非最佳，例如過大的學習速率會造成系統不穩定。經實驗結果，採取 0.01 為本控制器之最佳的學習速率。

b. 學習次數

在 $2 \times 5 \times 1$ 的網路架構之下，受限於電腦計算速度，最後選定的學習次數為 10 次。

c. 轉換函數：

控制器輸出值為正值或負值之推力差，因此採用雙曲線正切函數(Hyperbolic Tangent Function)。

值域介於 $[-1, 1]$ 之間。

(3) 能量函數之選定

圖 4

... 能量函數是加權值調整的依據。因此能量函數的選定直接與控制系統性能有關。本控制器為航向控制器，所以能量函數中之變數，除航向角 ψ 之外，另加上輸出推力差的變化率，用以考慮推進能量的損耗因素，即能量函數為：

$$E_k = \frac{1}{2}[\rho_1(\psi_a^k - \psi^k)^2 + \rho_2(\Delta T^k)^2] \quad (1)$$

其中 ρ_1, ρ_2 為常數，其值可以針對載具性能和控制器性能而調整，以達良好的控制效果。

4. 導航器之設計

水下載具運動過程中，受到來自波浪、纜線和洋流等外在干擾，而洋流則為自主式水下載具之主要干擾來源。例如，平面操控時，載具實際前進的方向並非其預設方向，而會受水流之影響而有所改變。一般用來克服干擾的方法，乃是利用位置控制器，在量取載具之位置偏移後，修正回原設定之航路。航路修正的方法，可使用垂直於航路之螺槳做誤差修正，也可以使用航向控制，在行進中做修正[8-11]。本文採取後者，即根據定位誤差修正航向，以達到位置控制目的。上述之平面運動位置控制器之架構如圖5所示。

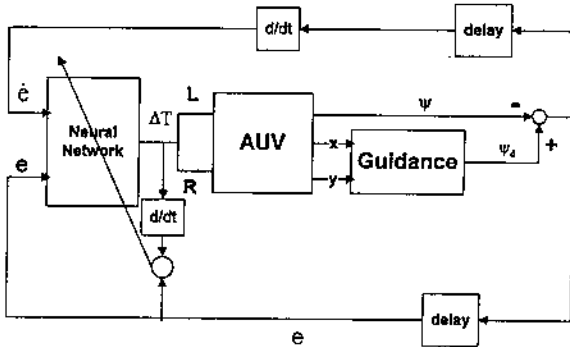


圖5 位置控制器架構

... 位置控制架構包含一航向控制器和導航器，由事先規劃的路徑和即時定位資訊輸入導航器，導航器依據載具的位置和規劃的路徑，經由幾何學計算輸出目標航向角，此目標航向角即為航向控制器所要控制的目標值，再由航向控制器輸出推力差，如此便可以做到位置控制。其優點在於導航器與航向控制器可分別設計，在實做上十分簡易。

以下就前述兩種基本路徑：即直線路徑控制、變換路徑控制，來做導航器的設計例子：

(1) 直線路徑

如果在沒有外力的影響下，利用航向控制器就可以達到直線路徑控制，即將目標航向角設為一個定值，其路徑即為一直線。然而，無法避免地載具會受外力的影響而偏離預設路徑，因此在控制器前必需加一個導航器，來校正與預設路徑間的誤差。

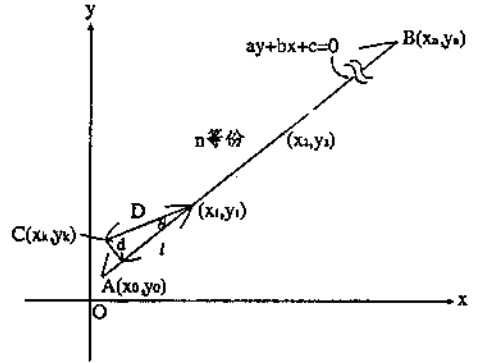


圖6 直線導航器

如圖6所示，載具欲從A點行進至B點，中間若受到干擾影響而偏離至C點，則此時的目標航向角就必需調整朝向目標點。然而若直接朝向終點B，其反應太慢，追隨效果不好，因此將整條線段等分成n段，則視偏離點C位於那段，再將目標航向角調成指向該段的末端點。

航向角度之求取可以利用簡單的幾何學原理，首先假設偏離的距離為d，A、B、C點三點的座標分別為 (x_0, y_0) 、 (x_n, y_n) 、 (x_k, y_k) 。則經過A、B兩點的直線方程式為 $ay+bx+c=0$ 。其中a、b、c可以用 (x_0, y_0) 、 (x_n, y_n) 求得。而偏離距離d，則可以由幾何學中點到直線的距離得到：

$$d = \frac{|ay_k + bx_k + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2)$$

而 C 點到 C 點所位於區間的末端點的距離 D ，則可以用兩點間的距離公式得到：

$$D = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} \quad (i=1 \sim n) \quad (3)$$

因此 C 點朝向 C 點所位於區間的末端點的角度 θ 可以利用三角函數得到：

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{d}{D}\right) \quad (4)$$

直線導航器之性能可以利用 n 的大小來調整，當 n 越大時，其追隨的效果越好。但是當 n 太大，目標航向角的變化率過快，而追隨效果並不見得會更好。所以視 A、B 點間的距離，再決定 n 的大小。讓每一區間的距離適中，在實驗結果中，以 2 至 3 公尺的長度，其追隨效果最好。

(2) 路徑變換

載具之轉彎雖可使用方向控制器達成，但對於任意曲線路徑之追蹤控制，為了易於規劃路徑，則仍可藉由直線路徑控制達成。在海域搜尋之路徑規劃中，圓弧路徑可視為變化較大的路徑之一，下列之導航器的設計例即是利用三段直線路徑來逼近一圓弧，如圖 7 所示。從 A 點至 B 點，若初始的角度為 ϕ_m^0 ，則其它的角度關係為：

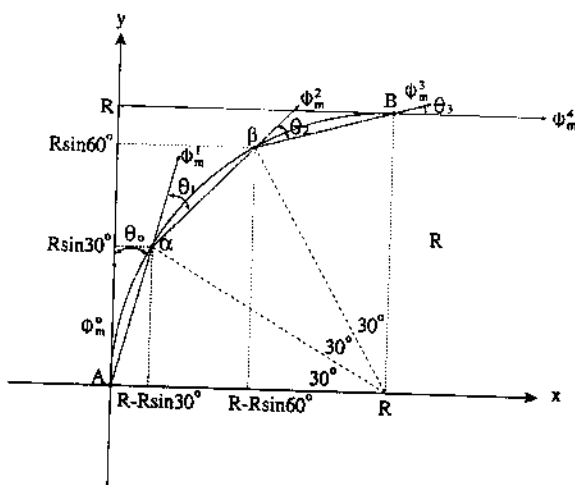


圖 7 路徑變換導航器設計構想

$$\phi_m^1 = \phi_m^0 + \theta_0$$

$$\phi_m^2 = \phi_m^1 + \theta_1$$

$$\phi_m^3 = \phi_m^2 + \theta_2$$

$$\phi_m^4 = \phi_m^3 + \theta_3$$

而 $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分別 15、30、30、15 度。如果轉彎的半徑為 R ，且 A 點的座標為 (x_0, y_0) ，則 α 、 β 、B 的座標可以表示如下：

$$\alpha \text{ 點的座標} = (x_0 + R(1 - \cos 30^\circ), y_0 + R \sin 30^\circ)$$

$$\beta \text{ 點的座標} = (x_0 + R(1 - \cos 60^\circ), y_0 + R \sin 60^\circ)$$

$$B \text{ 點的座標} = (x_0 + R, y_0 + R)$$

則整個轉彎就可由 $\overline{A\alpha}, \overline{\alpha\beta}, \overline{\beta B}$ 三線段組成。以上述路徑變換為例，載具最大的轉角為 30 度，因此在實驗上設計一個 30 度的直線路徑變換實驗，以觀察載具穩定追隨的能力，並可據以推求利用直線來逼近曲線時，適當的直線路徑長度。

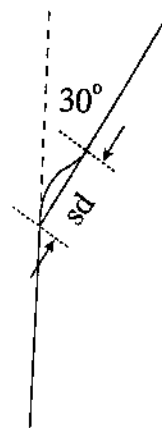


圖 8 30 度直線路徑控制

如圖 8 所示，假設載具在轉 30 度後，經過 \overline{sd} 的距離，可以穩定追隨，則最小之圓弧半徑 R 可以表示為

$$R = \overline{sd}(\sin 15^\circ + \sin 45^\circ + \sin 75^\circ) = 1.93 \overline{sd} \quad (5)$$

上述實驗方法來推求載具最短直線路徑的方法，適用於載具速度為定值之情況。

5. 實驗結果

實驗之施行地點為碧砂港口，目的為測試載具在海中航行時定位能力，及洋流對載具定位的影響。測試項目分為以下四部份：(1)使用航向控制器，並記錄都卜勒聲納所量測之洋流方向、大小，以瞭解洋流對載具方向控制之影響；(2)使用位置控制器控制直線路徑，並測試位置控制器在洋流中的性能；(3)設定一 L 型的路徑，即直線路徑之變換，以測試載具的控制能力；(4)30 度路徑變換實驗，以瞭解本文控制方法之限制。

(1) 航向控制

目標航向角設為 220 度，利用都卜勒聲納量測洋流，將載具下方的水層分為三層，並取最上層的流速，當作洋流的速度。所量測的洋流為一平均值。本次實驗結果，洋流的大小為 0.03 (m/s)，洋流的方向如圖 9 所示。從圖 9 可以看出載具之方向始終追隨 220 度，然而因為洋流的影響而偏離預設路徑。

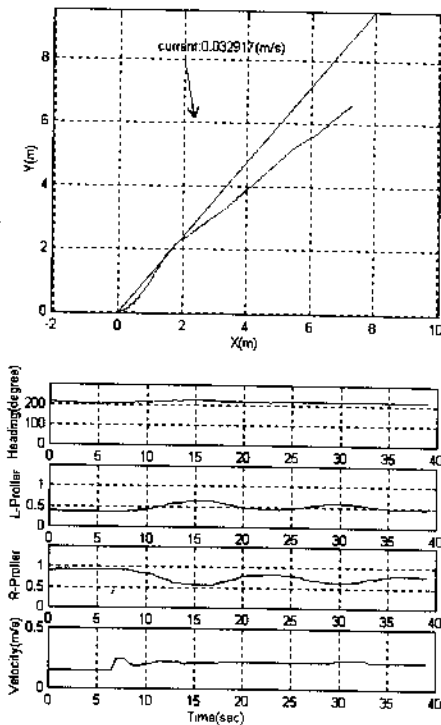


圖 9 洋流中之方向控制

(2) 直線路徑控制

使用位置控制模式，測試載具在洋流的干擾下，其路徑追隨的性能。載具所追隨的直線方向角度為 240 度。從圖 10 可以看出，載具能克服此洋流干擾的影響。

(3) L 型路徑

圖 11 中之路徑為長 15m、寬 9m 的 L 型路徑，直線方向為 240 度，轉彎為 90 度之轉彎。由實驗結果可以證實路徑變換下，位置控制器仍可以穩定控制。

(4) 30 度轉彎

為了測試載具在路徑變換時之最小直線路徑長度，本文設計一個 30 度的轉彎，以測試載具達到穩定的距離。由圖 12 估測載具在 0.25m/sec 速度下，達到穩定之直線路徑長度距離約為 4m。

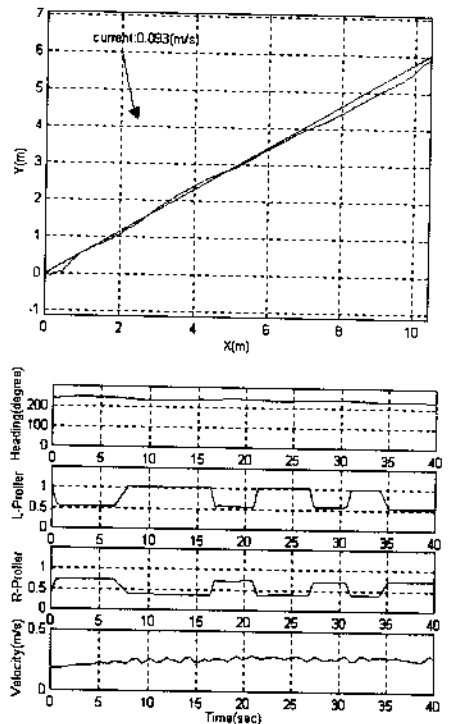


圖 10 洋流中之直線路徑控制

6. 結論

本文依據海域搜尋路徑控制之需要，發展一路徑控制器，並裝設在研發中之自主式水下載具試驗機，以測試路徑控制之性能。本研究之結論為：

1. 本文討論海域搜尋路徑規劃之重要參數：以類神經網路為基礎的航向控制器，需要調整之重要參數為加權值的初值和學習常數。而位置控制之目標點距離越近，其追隨效果越好，但穩定性則變差。
2. 由實驗結果證實當載具缺少導航器時，其直線路徑會受洋流影響而偏移，因此洋流的影響是不可忽略的。
3. L 型路徑為海域搜尋路徑規劃時所需的基本路徑，本文以實驗結果證實直線路徑控制及直線路徑變換之控制方法為可行。

謝誌

本文在研究經費上獲得國科會補助（計畫編號 NSC87-2611-E-002-016），謹此致謝。

參考文獻

- 1 邱逢琛, 郭振華, 賈景光 (1997) “自主式水下載具即時位置及姿態估測方法之研究”, 海洋工程研討會。
- 2 郭振華, 林明坤 (1997) “自主式水下載具長基線聲波定位系統之淺海域性能測試”, 國立臺灣大學造船及海洋工程學研究所碩士論文。
- 3 郭振華, 劉德志 (1997) “應用掃描式聲納影像序列在自主式水下載具定位及導航之研究”, 國立臺灣大學造船及海洋工程學研究所碩士論文。
- 4 T. Fuji and T. Ura (1994) “Neural-Network-Based Adaptive Control System for AUVs,” *Engng. Applic. Artif. Intell.* Vol. 4, No. 4, pp. 309-318.
- 5 J. Yuh (1990) “A Neural Net Controller for Underwater Robotic Vehicles,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 15, no. 3, pp. 161-166.
- 6 K.P. Venugopal, R. Sudhakar, and A.S. Pandya (1992)

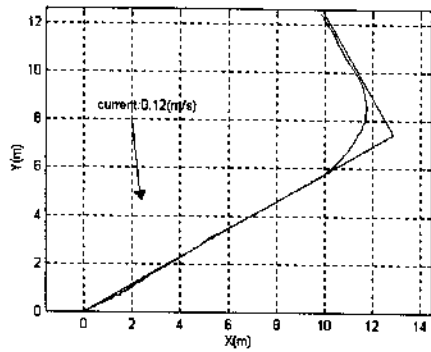


圖 11 L 型路徑控制

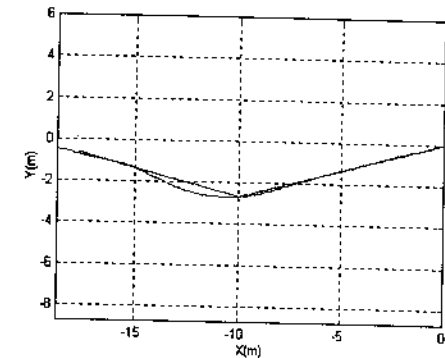


圖 12 30 度轉彎

“On-Line Learning Control of Autonomous Underwater Vehicles Using Feedforward Neural Networks,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 17, No. 4, October, pp. 308-319.

7. 郭振華, 邱達琛, 王傑智 (1996) “自主式水下載具流體動力模式與運動控制”, 國立臺灣大學造船及海洋工程學研究所碩士論文。
8. Yao Zhang, Grant E. Hearn, and Pratyush Sen (1996) “A Neural Network Approach to Ship Track-Keeping Control,” *IEEE Journal Of Oceanic Engineering*, Vol.21, No.4。
9. Yao Zhang, Grant E. Hearn, and Pratyush Sen (1997) “A Multivariable Neural Controller for Automatic Ship Berthing,” *IEEE Control Systems*。
10. Fotis A. Papoulias (1994) “Cross Track Error and Proportional Turning Rate Guidance of Marine Vehicles.”, *Journal of Ship Research*。
11. Michael John Cloutier (1990) “Guidance and Control System for an Autonomous Underwater Vehicle”, Master of Science Thesis in Computer Science, Naval Postgraduate School。