

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 高操控性自主式水下載具淺海域作業系統之整合技術研究 (III)-- 子計畫二：自主式水下載具固著型慣性導航系統設計之研究(III)

### Study on the strapdown navigation system for autonomous underwater vehicles. (III)

計畫編號：NSC88-2611-E-002-020

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：邱逢琛 台灣大學造船及海洋工程學系

#### 一、中文摘要

導航資料的整合，對於自主式水下載具提高水下作業能力有很大的助力。內部慣性定位系統的資訊，可提供載具即時的動態響應，再輔以載具之深度及速度資訊，則可大幅提高量測精度，而長基線外部定位系統，可週期性修正定位誤差，使載具可以長時期使用。本文的目的在使用一延展式卡爾曼濾波器(Extended Kalman Filter; EKF)之架構，以整合自主式水下載具內部與外部導航資料。根據海域實驗結果顯示，EKF 程式根據已知或估測的儀器測量誤差，可有效整合內部慣性導航系統、外部長基線定位系統及都卜勒速度聲納等導航儀器，提供載具即時的位置與姿態估測。

**關鍵詞：**水下載具、水下導航

#### Abstract

An Extended Kalman Filter is used to provide real-time estimates of the position and attitude of an autonomous underwater vehicle (AUV). The sensor suite of the AUV contains strapdown accelerometers, roll and pitch sensors, gyro and magnetic compass, depth sensor, long baseline positioning system, and a Doppler velocimeter. The increased accuracy obtained by integrating inertial measurements with external fixing aids and Doppler velocimeter outputs are evaluated by sea trials.

**Keywords:** underwater vehicles, underwater navigation

#### 二、緣由與目的

自主式水下載具 (Autonomous Underwater Vehicle; AUV) 與人工操作無人水下載具 (Remotely Operated Vehicle; ROV) 的差異：為自主式水下載具意指「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，所以自主式水下載具需要一套良好的自動導航系統，才能發揮載具的功能，達成任務的要求。由於載具往往在不適潛水夫工作的水域執行任務，其首要的需求資訊是本身的位置所在。現今發展中的航路定位系統主要可分為兩類，第一類為內部慣性導航定位系統，主要是由測量慣性力的元件組成，種類包括加速度計、磁力式航向角感測儀、光纖陀螺儀、深度計等。第二類為外部定位系統，主要原理為量測運動體與外部固定參考點的距離、角度等關係，據以計算運動體的位置，種類包括全球定位系統、及各式水下聲學定位系統等。

以上所述第一類的內部慣性導航系統，其基本工作原理為經由慣性力的量測元件得到運動體的加速度，再經由兩次積分過程得到運動路徑及相對位置；或以流速計等，直接量取速度，經由積分得到位置資訊。加速度或速度的量測值，皆有一定的雜訊及誤差，而積分的過程中誤差會累積增大，所以我們得到的位置資訊，在

一段時間的連續運作後，會發散而無法使用。為了解決這項問題，慣性導航系統在運作某一定週期後，需要依賴外部導航系統的資訊做修正。

而第二類的外部定位系統，依賴電波或聲波為媒介與外部固定參考點通訊。電波、聲波的往來傳播，需要一定的時間間隔，所以無法做任意的連續測量，這對於運動體的控制是不利的。外部定位系統的好處在於其誤差不會因長時間的使用而累積。

「整合性導航」(Integrated Navigation) 即結合上述兩類定位系統，整合各導航資訊，以便相互校正，得到更精準的位置資訊[1]。本文的目的在使用卡爾曼濾波器(Kalman Filter)之架構[2]，以整合 AUV 內部與外部導航資料，此卡爾曼濾波器程式根據已知或估測的儀器測量誤差，及載具的動態特性，以提供 AUV 即時的位置和姿態。

### 三、結果與討論

#### 1. 座標系定義與轉換

由於上述導航儀器，分屬各自所在的座標系，而為整合各導航系統，必須先了解座標系間的關係。常用到的兩個座標系為：大地座標系及載具座標系。以載具座標系所描述之狀態向量  $\dot{X}_V = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ ，與大地座標系之狀態向量  $\dot{X}_E = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$  可經由下式轉換：

$$\dot{X}_E = \begin{bmatrix} T_1 & 0 \\ 0 & T_2 \end{bmatrix} \dot{X}_V \quad (1)$$

其中， $(u, v, w)$  為載具座標系中三軸之速度， $(p, q, r)$  為載具座標系中之三軸角速度， $(x, y, z)$  為大地座標系中之三軸位置， $(\phi, \theta, \psi)$  為大地座標系中之三軸尤拉角(Euler Angles)。

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & \tan\theta \sin\phi & \tan\theta \cos\phi \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & -\cos\phi \sin\psi & \sin\phi \sin\psi \\ \sin\psi \cos\theta & \sin\phi \sin\theta \cos\psi & \cos\phi \sin\theta \cos\psi \\ \sin\psi \cos\theta & \cos\phi \cos\psi & -\cos\psi \sin\phi \\ \sin\psi \cos\theta & \sin\phi \sin\theta \sin\psi & \sin\theta \sin\psi \cos\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta \sin\phi & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

#### 2 內部定位系統

載具內部所攜帶之慣性定位系統(Inertial Navigation System; INS)，是由固定在載具內的加速度儀(Linear Accelerometers)和角速度儀(Angular Velocimeters)所組成。由於其位置推算是由加速度經二次積分所得，因此其訊號易隨時間快速發散。

本文採用固裝式內部定位系統(Strapdown INS)，也就是將三個加速度計，分別對 X, Y, Z 三軸固定裝設。其測量方程式為：[3]

$$\begin{aligned} a_x &= \ddot{u} + qw - vr + a_x(-p^2 - r^2) \\ &+ a_y(-r + qp) + a_z(\dot{q} + pr) + g \sin\theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\alpha_Y &= \dot{v} - pw + ur + a_x(\dot{r} + qp) \\
&+ a_y(-p^2 - q^2) + a_z(-\dot{p} + qr) - g \sin\phi \cos\theta \\
\alpha_Z &= \dot{w} + pv - qu + a_x(-\dot{q} + rp) \\
&+ a_y(\dot{p} + rp) + a_z(-p^2 - q^2) - g \cos\theta \cos\phi
\end{aligned} \tag{4}$$

其中  $(\alpha_X, \alpha_Y, \alpha_Z)$  為三軸加速度計之量測值， $\vec{X} = (a_x, a_y, a_z)$  為 INS 到 AUV 轉動中心的幾何距離， $g$  為重力加速度之數值。

我們需要載具座標系的資料為  $(\dot{u}, \dot{v}, \dot{w})$ ，但加速度計之量測值為  $(\alpha_X, \alpha_Y, \alpha_Z)$ ，由式(4)可知，必須量測角速度資訊  $(p, q, r, \phi, \theta, \psi)$ ，以求得正確的加速度量，而加速度數值的精確度也受角速度量測值精確度的影響。

INS 中另外一個重要的儀器，即為測量姿態的角度及角速度儀。磁力式航向角感測儀 (Flux-gate Magnetic Compass)，乃利用地球磁場效應感測載具之姿態改變，其雜訊以白雜訊 (White Noise) 為主，沒有明顯的漂移 (Drift)，但易受外部環境中之磁力效應影響而產生短暫波動的現象。

常見的角速度儀中，以光纖陀螺儀 (Fiber Optic Gyro; FOG) 為例，其精度較磁力式航向角感測儀高，且不受外界干擾，但長期使用時會產生每小時 3~6 度的漂移。

### 3 都卜勒速度聲納外部定位系統

都卜勒速度聲納 (Doppler Velocity Log; DVL) 為一主動式聲納測速儀器，將其裝置在水下載具下方，向海底發出聲波，並接受其反射訊號，利用都卜勒原理計算可得各軸相對海底之速度，其計算之公式如下：

$$\text{相對速度 } V = F_D \times \frac{C}{2F_S} \tag{5}$$

其中  $C$  為聲速， $F_D$  為都卜勒頻率偏量 (Doppler Frequency Shift)， $F_S$  為都卜勒聲納頻率。

DVL 可直接測量到三軸之速度，其速度資訊較 INS 所推算者為直接且準確。DVL 為主動式聲納，依靠外部參考物體，如海床等，推求載具速度，而其速度依據座標轉換公式(2)、(3)，再積分後可得位置，在使用上較外部定位系統方便；但都卜勒聲納之取樣頻率與載具高度、聲速、激發次數有關，而非固定值，甚至常因海底地形之影響而無法收到訊號，造成資料脫鎖。

### 4 長基線外部定位系統

長基線定位系統 (Long Baseline System; LBL) 利用海床上架設自動回訊器 (Transponder) 網路，並由載具上裝置之轉換器 (Transducer)，以不同頻率發射聲波至各自動回訊器，其聲波再傳回轉換器，由訊號傳送時間，可推算出下水載具與各自動回訊器間的斜距。

若在海床上架設超過三個自動回訊器，則多出的接收斜距資訊，可用作比對校正來增加精準度，在某些自動回訊器因水中遮蔽物、陰影區的干擾而失效的狀況下，使系統仍可正常運作。但 LBL 系統因架設與回收較為費時，並且需要做現場校正工作，故此系統較適合在設定之海域中長時期使用[4]。

### 5. 實驗

我們選取下列儀器進行整合導航的實驗：(1) 長基線定位系統；(2) 固著式慣性導航系統，包含高精度加速度計三具及光纖陀螺儀(Fiber Optic Gyro)。(3) 磁力式航向角感測儀、傾斜儀、深度計各一具；(4) 都卜勒速度聲納。

導航儀器均裝置於如圖 1 所示之自主式水下載具「海敏一號」[5]，並以載具內部電池供電，載具電腦與各量測儀器間通訊方式，長基線定位聲納與都卜勒速度聲納使用 RS-232 通訊，其餘均以 A/D 介面卡直接讀取資料，導航資料由載具電腦即時處理，其中各程式使用 C 語言環境撰寫。

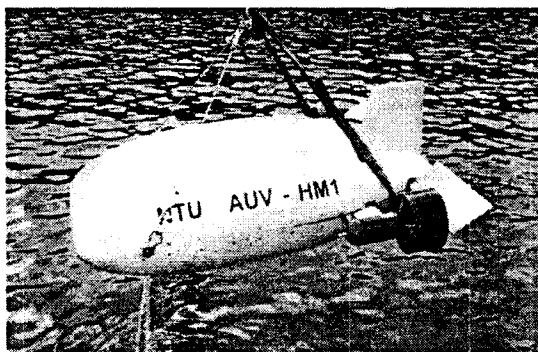


圖 1 自主式水下載具試驗機  
「海敏一號」外觀

實驗時，長基線定位系統及固著式慣性導航系統的取樣頻率分別為 0.5 Hz、10.0Hz，都卜勒速度聲納的取樣頻率為 1.0Hz，卡爾曼濾波器的計算頻率為 2.0 Hz。實驗水域為基隆碧砂港外海水深 50 公尺至 70 公尺處，實驗時工作船同時記錄 GPS 資料，載具約以每秒 1.5 公尺速度前進。圖 2、3 所示分別為 1998 年秋季、1999 年夏季之載具導航資料。水流大小約為 2~2.5 節，方向西南。其中，細線為經濾波器整合後的軌跡圖，粗線為 GPS 的軌跡圖，比較後可知經濾波器整合之資訊

與 GPS 類似，證實使用卡爾曼濾波器的整合導航在海域實驗中的可行性。且在不同季節及洋流環境下，定位結果均保持穩定。角度估測方面，將光纖陀螺儀與磁力式航向角感測儀整合使用後，不但精確度得以提升，對光纖陀螺儀的偏移量與磁力式航向角感測儀短暫波動等的問題之解決，都有十分良好的結果。

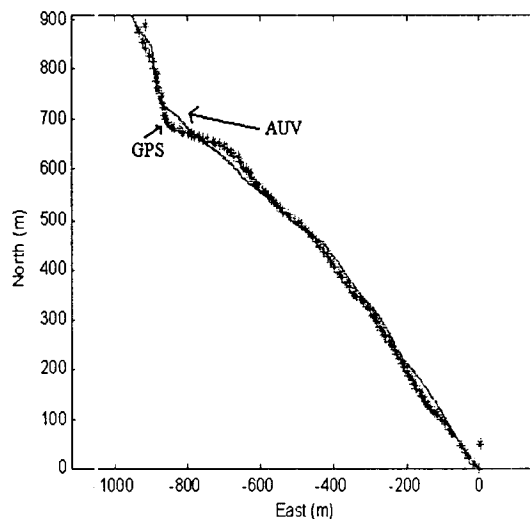


圖 2 載具導航軌跡  
(細線為經濾波器整合後的軌跡圖，粗線為 GPS 的軌跡圖)

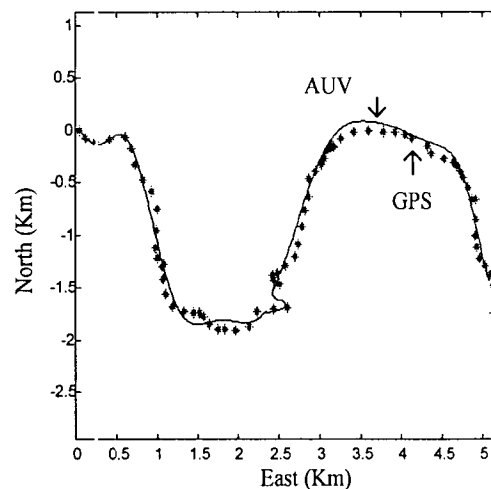


圖 3 載具導航軌跡  
(細線為經濾波器整合後的軌跡圖，粗線為 GPS 的軌跡)

## 6. 結論

(1)導航資料的整合，對於自主式水下載具提高水下作業能力有很大的助力。內部定位系統的資訊，可提供載具即時的動態響應，再輔以深度及速度的資訊，則可大幅提高系統的量測精度，而長基線定位系統，可週期性修正定位誤差，使定位系統可長期的使用。

(2)內部定位系統的角度量測精度比加速度量測精度重要許多，因此如何增加角度的精度十分重要。刪除偏離點與估測漂移量等方法對於角度估測精度之提升均有不錯的效果。

(3)由實驗結果，卡爾曼濾波器可成功地整合內部定位、都卜勒速度聲納與外部定位資訊，使定位資訊在速度、位置、姿態上均有良好的結果。內部定位系統由於受到重力加速度之影響，對於低速運動之載具而言，在高度測量上有很大的誤差，使用深度計則可直接量測深度資訊。強健性卡爾曼濾波器將偏離的資料點刪除，使其不會影響濾波效果，使載具於水下長期作業時，可保持系統強健性與穩定度。

(4)若要進一步增加定位系統的性能，必需使用與載具動態方程式合併的卡爾曼濾波器，但相對地便增加計算時間。

(5)水下定位技術中，除本文所提及之定位方法外，利用視覺聲納觀測外界環境，以回推載具本身位置的視覺導航法，可使載具在接近海下結構物，或以海床為導航參考時進一步提高定位精度[6]。

## 四、參考文獻

[1] 何志強，“INS/GPS 整合導航系統”，

中山科學研究院慣性導航組 (1996)

[2] Chui, C. K., G. Chen, *Kalman Filtering with Real-Time Applications*, Springer-Verlag (1990)。

[3] 邱逢琛、郭振華、王傑智，“自主式水下載具流體動力模式與運動分析”，*國立臺灣大學造船及海洋工程研究所碩士論文* (1996)。

[4] 郭振華、邱逢琛、林明坤，“自主式水下載具長基線聲波定位系統之淺海域性能測試”，*中國造船暨輪機工程學刊*，第十八卷第四期 (1999)。

[5] 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)

[6] J. Guo, T.-C. Liu, S.-W. Cheng, “Visual Navigation of an Autonomous Underwater Vehicle Using Image Sequences of A Scanning Sonar,” *Oceans '98*, Nice, France (1998).