

行政院國家科學委員會專題研究計畫期末成果報告

影像伺服技術應用於無人載具水下管線追蹤之研究

Visual Servoing for Pipeline Tracking by Unmanned Underwater Vehicles

計畫編號：NSC 90-2611-E-002-038

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：郭振華

國立臺灣大學造船及海洋工程學系

摘要

本文建構使用無人水下載具追蹤水下管線的影像導航方法，目的為控制載具與管線之距離，並沿著管線以等速度前進。載具所攜帶之感測儀器包括視訊攝影機、掃瞄聲納、及運動量測儀器。首先，利用視訊影像識別管線之邊緣，並整合視訊及聲訊影像，求取水下管線在三維空間之位置，再進一步整合管線位置及載具的運動數據，估測載具之運動狀態，用以控制載具相對於管線的運動。本計畫使用自製之無人水下載具試驗機，在水槽及淺海域做管線之影像識別、以及管線之追蹤實驗，以達到正確地識別管線，以及精確地追蹤管線之目的。本計畫建立水下載具追蹤管線之影像伺服系統，確認系統參數與控制性能的關係，並對未來研究方向提供建議。本計畫所建立的管線追蹤技術可應用於無人水下載具水下管線檢測作業，具有實用價值。

關鍵詞：水下載具、影像追蹤、控制

Abstract –We design a stable tracking method for a semi-autonomous platform to support routine underwater inspections of underwater structures. A reasonable inspection path of the vehicle is first planned, input signals such as reference posture and reference velocities to the vehicle are calculated. Then a tracking controller is used to track those input commands. The tracking controller has a structure similar to the well-known PD control and the sliding mode control. The stability of this tracking method is proved through the uses of a Lyapunov function. It was also shown that the tracking error is exponentially convergent. Simple relation between control parameters and the exponential factor was derived. Finally, the effectiveness of the method was verified using a series of water tank experiments.

Index Terms – underwater vehicles, visual tracking, control

一、動機

近年來，有關水下管線定期檢測之研究日益受到重視，例如海下通信纜線、油氣輸送管線、廢水排放管線等之鋪設，皆因通信需求量增加、工業化程度提高、及人口增加之緣故，而必須大幅增多。水下管線數量之增加，也提高了管線故障的頻率，例如沿岸海下管線被漁具、潮流破壞之情形時有所聞。目前在管線之維修上，最常使用工作型 ROV (Remotely Operated Vehicles；遙控式水下載具)，配合其支援工作船，而此等系統大多為水下施工之目的，並非專為管線檢測所設計。因此，系統較為複雜、成本較為昂貴，效率亦非最佳，並不適於作為水下管線經常性維護及檢查之用。針對此需求，必須研發輕便的管線檢查工具，如小型無人水下載具系統設計、自動化管線追蹤方法等。本研究擬從事以自動化追蹤水下管線為目的之相關系統；即水下無人載具之操控導航、影像處理、影像伺服等技術之整合性探討，以瞭解此等水下觀測系統諸設計參數對整體性能之影響，並以實驗來確認本研究之結論，做為爾後研發水下管線維修檢測專用載具，及其操控導航系統設計之參考。

本文預設的檢測管線形式為直線、大部分外露於海底，暫不考慮深埋於泥土中之管線。本研究使用之影像感測器包含視訊及聲訊二種，視訊攝影機及掃瞄聲納是目前多數海下觀測系統之基本配備元件，視訊攝影機可直接取得管線之外觀形狀，聲納則可掃瞄物體外型，取得載具與目標物之距離影像。本系統擬根據視訊及聲訊影像之整合結果，判斷管線位置及方位，及控制無人載具追蹤此管線。至於深埋於泥土中之管線，例如通訊海纜等，需要大型機具鋪設，且需通入電流以便由泥土外部探查其位置，所需的測試設備及人力規模龐大，並不適於本計畫之執行。然而，本計畫所研究之影像伺服、資料處理及感測器資訊整合等技術，除了所使用之感測器形式不同外，在原理上可同樣適用於埋設於泥土中之管線追蹤。

陸地環境下的影像伺服技術已有許多實例 [1]，如公路上汽車之自動駕駛設計、移動式機器人

在室內之影像導航等 [2-4]，皆為影像伺服應用在追蹤線型特徵的例子。雖然水下管線檢測亦為線型追蹤之應用，但有下列幾點不同：1. 水中影像由於散射、反射等干擾現象，因此較為模糊；2. 由於點狀照明燈的運用，水中視訊影像在像平面中間及邊緣的亮度差異大、物體之亮度亦隨著照明燈運動而改變；3. 由於光線在水中能量較陸上衰減較快，水中視訊影像之可視範圍較小；4. 水下管線由於海藻或泥土附著、或由於載具運動所激起之懸浮物質，較不易取得完整的管線影像；但相對於陸地上而言，由於水中人造物較少，管線之線型特徵較易分辨；5. 水下載具之動態，如橫搖角、縱搖角、深度等易受到水流影響而產生擾動，造成連續影像間關連性小。除了視訊影像外，多需配合其他輔助之導航儀器及載具運動模式，方可達到較為精確的導航定位。使用自動化技術從事水下管線或水下結構物之檢測方面，目前已有許多相關的文獻可供參考 [5,6]，整體而言，穩定可行之商業系統尚待實現，許多新的方法正在研發及測試中，是一個正在發展、具實用性之研究領域。

二、使用管線影像估測載具運動

由於視訊影像所提供者為管線之平面資訊，而聲訊影像所提供者為管線之距離資訊，經由視訊影像取得之管線邊緣，再由聲訊影像得知管線所在平面對載具的關係，可求得管線所在平面對攝影機座標之方程式，根據此平面方程式及管線特徵，可求得管線座標之三維資訊。由於現有之管線追蹤相關文獻中，皆以視訊攝影求取管線影像，所以需要假設海底為水平且管線平躺於海底平面，但本計畫所提出影像資訊融合之想法，則無須做此假設，因此可處理非完全水平鋪設之管線，應用範圍較為廣泛。

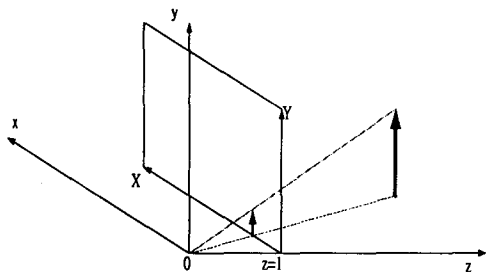


圖 1 攝影機及影像座標， $x-y-z$ 為攝影機座標， $X-Y$ 平面為影像座標， $X=x/z$ $Y=y/z$ ， z 軸的长度單位為攝影機的常數 F

假設攝影機以速度 $\dot{r} = [T_x \ T_y \ T_z \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ 移動，則在攝影機座標上的某一點 $P(x,y,z)$ 對攝影機的相對速度為

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -z \cdot \omega_y + y \cdot \omega_z - T_x \\ \dot{y} &= -x \cdot \omega_z + z \cdot \omega_x - T_y \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{z} = -y \cdot \omega_x + x \cdot \omega_y - T_z$$

代入 $X=x/z$ $Y=y/z$ ，將 X 及 Y 微分可得下式

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{z} & 0 & \frac{X}{z} & XY & -(1+X^2) & Y \\ 0 & -\frac{1}{z} & \frac{Y}{z} & (1+Y^2) & -XY & -X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

或

$$\dot{f} = J(r) \cdot \dot{r} \quad (3)$$

上式中 \dot{r} 為攝影機的速度， \dot{f} 為影像特徵參數的時變率， $J(r)$ 為攝影機的速度及影像特徵參數變化率的線性轉換。由於我們以 ρ 、 θ 作為管線邊緣的影像參數，因此需要對上式做調整，以得到適當的 $J(r)$ 。為了得到 $J(r)$ ，我們必須知道管線邊緣所在的平面；假設影像聲納與攝影機之 y 軸相同，其 x 軸（前進方向）互相平行、 z 軸（深度方向）互相平行；海底平面在 y 方向上無變化。影像聲納所得的是海底平面在 $x-z$ 方向上的變化（參數為 D 、 α ），如圖 2 所示。

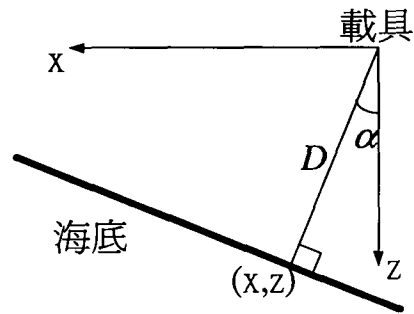


圖 2 海底平面於影像聲納座標中的位置

此平面在聲納座標中的方程式為

$$z \cos \alpha + x \sin \alpha = D \quad (4)$$

由於之前假設聲納與攝影機之 y 軸相同、 z 軸互相平行，因此計算出的結果可以直接用於 $J(r)$ 。

三、影像伺服控制系統

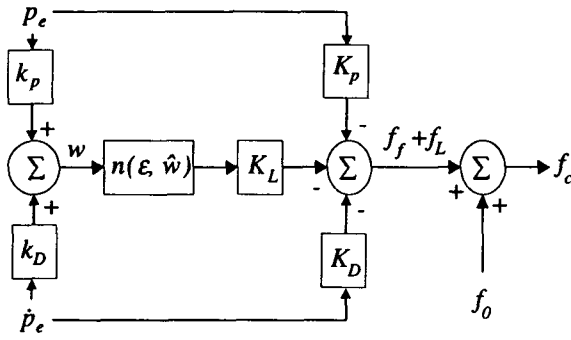


圖 3 載具控制器方塊圖

載具的控制器，由導航器計算所得的姿態誤差 p_e 及其微分 \dot{p}_e 作為輸入，經由控制器輸出命令推力 f_c ，推動載具螺槳做位置及方向角控制，過程中經由導航系統測得取樣時間的位置、速度、深度、方向角等資料，作為回授 p_c ，完成整個載具導航控制器之閉迴路。圖 3 所示為載具控制器之方塊圖。

命令推力 f_c 由下述三部分所組成：

$$f_c = f_0 + f_f + f_L \quad (5)$$

其中

$$f_0 = m\ddot{p}_c - \hat{c} - \hat{d} - \hat{g} \quad (6)$$

為載具受力的數學模式。式中 m 為載具之質量矩陣，包含慣性質量及附加質量、 \hat{c} 代表科氏力及離心力， \hat{d} 代表阻尼力，以及 \hat{g} 代表重力。載具回授項由比例-微分 (P-D) 控制法所構成，

$$f_f = -K_p p_e - K_D \dot{p}_e \quad (7)$$

比例-微分控制器可以改善系統的相對穩定度，增加系統的頻寬，加速系統的響應速度。然而，比例-微分控制器將不利於雜訊的抑制，對穩態並無改善作用。

誤差補償項 f_L ，由矩陣 K_L 與函數 n 所組成，

$$f_L = -K_L n(\epsilon, \hat{w}) \quad (8)$$

圖 3 中， \hat{w} 為 w 之估測值。在控制器中兩者視為相等。圖 4 所示為 n 之定義。 n 為任意片段連續函數，並且符合以下兩點描述：

1. $\|\hat{w}\| n(\epsilon, \hat{w}) = \|n(\epsilon, \hat{w})\| \hat{w}$
2. $\|n(\epsilon, \hat{w})\| \geq 1 - \frac{\epsilon}{\|\hat{w}\|}$, $\|\hat{w}\| > \epsilon$

n 與滑動模式控制中的飽和函數 (saturation function)

相當，利用滑動函數的特性，可將誤差量強制收斂至邊界層 (boundary layer) 內，且於邊界層中追隨滑動面 (sliding surface)。當誤差量於滑動面上時，則稱為滑動模式 (sliding mode)。 f_L 的作用主要是利用滑動模式控制的方法來消除因為系統動態的非線性及不確定性所造成的載具控制誤差量，對於穩態誤差將有所改善，此控制方法與 [5] 所述之架構近似。由載具定位的觀點，螺槳推進器之非線性特性造成定位誤差，因此也可視函數 n 的性質與螺槳的性能曲線相當，當 $-\epsilon \leq \hat{w} \leq \epsilon$ 的時候， $n=0$ ，表示在這個區域內，馬達是不被作動的，如此可避免螺槳馬達軸系因設置防水軸承所導致之非線性行為。

前述說明了影像中特徵的動態對攝影機動態的關係，然而影像伺服控制需要的是相反的關係——輸入影像特徵參數的變化率 (\dot{f}) 以計算出攝影機的速度 (\dot{r})。

$$\dot{r} = J^+ \dot{f} + (I - J^+ J(r)) \cdot s \quad (10)$$

其中 J^+ 為 $J(r)$ 的反算，由於 $J(r)$ 為 $m \times k$ 之矩陣， m 為工作空間的自由度， k 則為影像特徵參數的個數。當或 $k > m$ 時，上式的右邊第二項為 0；若 $k < m$ 時，上式的右邊第二項不為 0，亦即觀測的參數數目不足，無法計算攝影機所有方向的速度，需要給予額外的資訊 (s) 才能完整地計算各方向速度。由於管線邊緣有兩條，每條邊緣只有兩個特徵參數 (ρ, θ)，因此 $k = 4$ 。攝影機在三度空間運動有六個自由度 ($m = 6$)，所以為 $k < m$ 的情形。

我們可以定義一誤差函數 $e(f)$ ，

$e(f) = f_d - f$ ； f 為影像中被觀測物之特徵值， f_d 為預定之目標值。將誤差函數 $e(f)$ 取代 \dot{f} ，我們希望攝影機移動的距離為 s ，則 p_e 為攝影機對被觀測物的位置誤差：

$$p_e = J^+ \cdot e(f) + \beta \cdot (I - J^+ J(r)) \cdot s \quad (11)$$

其中 β 為一任意的增益矩陣

由於攝影機是被固定在載具上，因此可以將攝影機的位置誤差轉換為載具的位置誤差，由上式的結果再經轉換就可以得到載具對被觀測物的位置誤差，也就是由攝影機控制載具的運動。

因為影像需要經過處理，所以在本文實驗中的影像回授的週期為 2.5 秒，也就是每 2.5 秒才能得到載具對管線的距離誤差，但是對載具的控制週期卻不能如此長。因此我們需要將影像回授的資訊與導航元件的資訊做融合，使載具每 0.5 秒都能得到控制的命令。導航資料融合的方法是使用卡爾曼濾

波器。利用所計算出之距離誤差及其變化量 p_e 及 \dot{p}_e ，做為載具控制器之輸入，經由控制器送出命令推進力 f_c ，再經由螺旋槳馬達輸出實際推進力 f_a ，推動載具作位置及方向角控制，並經由都卜勒聲納測得每一個取樣時間的位置、速度、深度、方向角等資料，作為回授，完成整個載具導航控制器之閉迴路控制。

四、實驗

本計畫使用之水下載具之外觀，及其驅動器、感測器佈置如圖 4、圖 5 所示。圖 6 所示為載具追蹤管線過程中，其路徑及對應之影像。管線追蹤時，起始位置的不同決定了載具追蹤的路徑，若起始位置能保持在管線正上方，且平擺角與管線角度相同，則載具的追蹤路徑會很快收斂，不會發生大幅振盪。載具前進速度的不同也會影響到路徑追蹤的誤差，速度慢時載具對管線的橫向位移誤差及角度誤差較小。若要以較快速度前進，則需配合較短週期的影像回授及導航感測器回授，才能得到良好的結果。本文實驗中，影像回授間距為 2.5 秒，這段時間內主要為處理影像及計算影像參數，若能縮短計算時間(例如 0.5 秒至 1 秒) 使影像回授頻率提高，應可以使追蹤路徑的誤差降低。

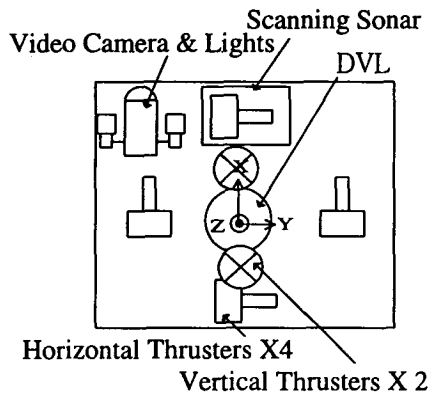


圖 4 載具驅動器及感測器佈置



圖 5 載具外觀

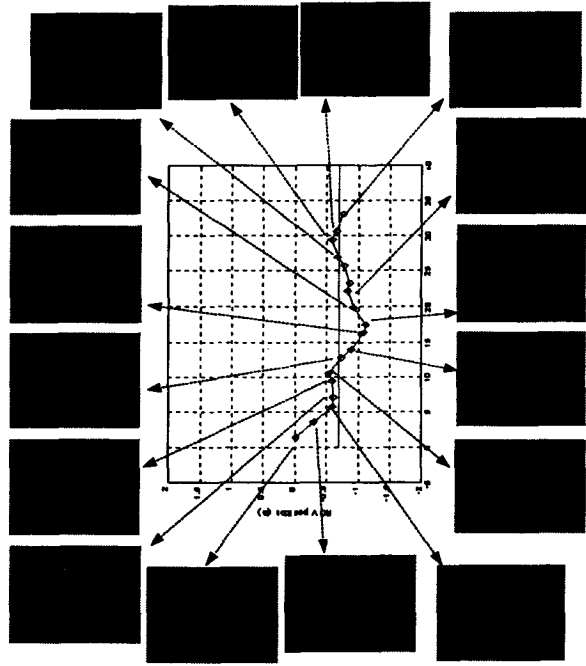


圖 6 追蹤過程中，載具路徑及對應之影像。追蹤的目的為保持載具與管線等距離，並保持管線影像於畫面之正中央

五、結論

本計畫完成管線及影像識別系統之設計及性能驗證，以及載具導航及控制系統之設計及性能驗證。以下就完成之工作項目及具體成果做進一步之敘述。

1. 完成視訊影像及聲訊影像處理軟體模組，其功能為求取視訊影像及聲訊影像中之管線特徵。
2. 完成影像資料融合，此模組之功能為融合視訊以及聲訊影像所萃取之線型特徵，以估測水下管線之位置及方向。
3. 完成水下管線影像處理及識別實驗，以評估本計畫所提出管線成像及識別方法之有效性。
4. 完成導航資料融合模組，可用以結合管線影像及載具之導航資訊，以便相互校正，得到更精準的位置資訊。
5. 完成載具控制器設計，提供現有載具等速追蹤水下管線之功能，並證明此導航控制系統之穩定性，及瞭解控制性能與系統參數間之關係。

影像伺服技術在自動化領域為一十分重要之課題，本研究針對水下管線自動化檢測之需求，建立無人水下載具之影像導航技術，可做為爾後研發水下管線維修檢測專用載具，及其操控導航系統設計之參考。

參考文獻

1. S. Hutchinson, G. D. Hanger, and P. I. Corke, "A

- Tutorial on Visual Servo Control," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No.5, October 1996.
2. Y. Ma, J. Kosecka, S.S. Sastry, "Vision Guided Navigation for a Nonholonomic Mobile Robot," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 5, No.3 June 1999.
 3. Z. Zhang, R. Weiss, and A. R. Hanson, "Visual Servoing Control of Autonomous Robot Calibration and Navigation," *Journal of Robotic Systems*, 16 (6), pp. 313-329, 1999.
 4. C. J. Taylor, J. Kosecka, R. Blasi, J. Malik, "A Comparative Study of Vision-Based Lateral Control Strategies for Autonomous Highway Driving," *The International Journal of Robotic Research*, Vol. 18, No. 5, pp. 442-453, May 1999.
 5. C.-C. Wang, S.-W. Shyue, and S.-H. Cheng, "Underwater Structure Inspection with Laser Light Stripes," *Proceedings of the 2000 International Symposium on Underwater Technology*, Tokyo, Japan, pp. 201-205, May 2000.
 6. G. L. Foresti, S. Gentili, M. Zampato, "Autonomous Underwater Vehicle Guidance by Integrating Neural Networks and Geometric Reasoning," *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 10, pp.385-396, 1999.