

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

智慧型水下機械臂系統之研究-動態模擬與適應控制 Study of Intelligent Underwater Manipulator Systems - Simulation and Adaptive Control

計畫編號：NSC 86-2611-E-019-023

執行期限：85年8月1日至86年7月31日

主持人：林鎮洲 國立台灣海洋大學機械與輪機工程學系

一、中文摘要

本研究中我們對單軸水下機械臂進行系統參數估測(不包括水流力與摩擦力)，得到的結果和過去的量測結果作比較。實驗所得到的結果顯示，以 filtered dynamic model 所得的估測值相當接近於直接量測值。此外，我們發現以估測參數值進行動態模擬，其軌跡與實驗值相比較非常吻合。由此推論，以系統參數估測法則所得到的估測值雖未必是該參數的精確值，但以整體系統進行模擬時，卻可以精確地描述該系統的動態行爲。

Abstract

We investigate the parameter identification problem of a single-jointed underwater robot arm (not including fluid force and friction force). The results are then compared with those from direct measurement. It shows that, by filtered dynamic model, the estimated parameter values are close to that of previous experiments. The trajectories match very well between dynamic simulation (using estimated values) and experiments. We conclude that the estimated parameters although not precise, can predict the dynamic behavior of the system very well.

二、緣由與目的

機械臂在水中的動力因素，包括浮力、水阻、昇力、附加質量所產生之慣性力及非靜止水流所產生之水流力等，其力學模式遠較陸地一般機械臂複雜且難於估測[1-5]。我們曾於另一相關計劃中[6]，以實驗方法量測單軸水下機械臂之水阻係數、水阻扭矩係數、附加質量與附加慣性矩等參數。採用此方法獲得動力參數，我們便可以建立一個水下機械臂的動態模型，並且模擬其運動過程。本計劃中我們主要以系統辨識的技術，對水下機械臂進行動力參數的辨識。建立好的系統參數辨識能力有助於水下機械臂適應控制法則的運用[11,12]。此乃因為在適應控制法則中，吾人必須對控制對象進行線上參數估測，以便得到一個穩定的控制模式。而水下機械臂的動力參數中，水流所施加在機械臂上的水流力通常是一個不斷變化的外力，故我們必須對其進行參數估測。而其它係數在透過參數估測之後，通常也能得到一個較符合控制系統的值。本計劃中，我們將對單軸水下機械臂進行系統辨識(但不包括水流力的辨識)，得到的結果再和過去的量測結果作比較。一旦比較結果在合理的誤差範圍內，我們便能夠進一步對水流力進行估測，以便建立適應控制

法則於水下機械臂上。

三、研究成果

本研究之主要成果是(1)完成建立單軸水下機械臂之動態模型，(2)將以上模型擴展至多軸水下機械臂，(3)建立系統辨識技術以獲得系統的動力參數，其中包括質量、質心位置、水阻係數、慣性矩、附加質量、附加慣性矩等。茲分別就各項主要結果敘述如下：

(一) 單軸水下機械臂之動態模型

水下機械臂與一般之陸上之機械臂之差異在於水下機械臂受到而外之浮力，水阻力(Drag force)，昇力(Lift force)，附加質量，附加慣性矩，水流力等之外力影響。其中浮力為水中不同深度所產生之壓力差所造成的力是屬於流體靜力。浮力可以表示為液體密度與物體體積之乘積，即是與物體同體積的液體重量，即

$$F_B = \rho Vg, \quad (1)$$

其中 ρ 為液體密度， V 為物體體積

水阻力與昇力是由壓力，黏滯力與渦流散發所產生的力而形成的。其中昇力垂直於流速方向，水阻力則平行於流速方向。在本研究中，我們為了簡化問題，將暫不討論昇力之影響，而水阻力可表示為

$$F_d = C_d \frac{1}{2} \rho A |v| v \quad (2)$$

其中 C_d 為水阻係數， v 為體積相對於流體之速度， A 為垂直水流之截面積。至於水阻產生之扭力矩 T_d 可表示為

$$T_d = r \times F_d = C_D \rho A \lambda^3 \theta \quad (3)$$

由以上可知水阻力正比於速度的平方，而水阻扭力則正比於角速度的平方。在[6]所量測得之水阻力係數 C_d 為 1.2357，水阻扭力係數 C_D 之量測值為 0.3111。

當物體在水中以加速度或角加速運動時，需克服阻力，此外尚需克服物體與物體周圍之流體加速所產生之慣性力。此部份之力量，吾人一般以附加質量(Added mass)和附加慣性矩(Added moment of inertia)與物體的加速度之乘積表示。即是

$$F_a = m_a \frac{dv}{dt}, \quad \text{其中 } m_a \text{ 為附加質量，或}$$

$$T_a = I_a \frac{d\omega}{dt}, \quad \text{其中 } I_a \text{ 為附加慣性矩。在[6]$$

中所量測得之附加質量係數 C_a 為 1.5008，附加慣性矩係數 C_A 之量測值為 1.2463，即 $I_a = 0.0484$ 。綜合所得之結果，我們可推導出在無水流力與昇力影響之下之單軸水下機械臂的動態模型如下

水平旋轉模式：

$$n = I\alpha + I_a\alpha + T_d \quad (4)$$

垂直旋轉模式：

$$n = I\alpha + I_a\alpha + T_d + d(mg - \rho Vg) \cos \theta \quad (5)$$

(二) 多軸水下機械臂之動態模型

考慮以上水中的動力效應，我們將單軸水下機械臂的動態方程式擴展至多軸水下機械臂，茲討論如下。考慮水下機械臂之第 k 桿所受的總力，吾人以 k 參考座標來探討 Newton-Euler equation 即

$$F_k = M_k \left[{}^k a_k + {}^k \alpha_k \times {}^k d_{ck} + {}^k \omega_k \times ({}^k \omega_k \times {}^k d_{ck}) \right] \quad (6)$$

$$T_k = I_k {}^k \alpha_k + {}^k \omega_k \times (I_k {}^k \omega_k) \quad (7)$$

其中 F_k 為作用於 k 桿質心之總力， T_k 為作用於 k 桿質心之總扭矩， M_k 為 k 桿本身的質量 m_k 及附加質量 m_a ， I_k 為 k 桿本身之質量慣性矩及附加慣性矩， ${}^k d_{ck}$ 為 k 接點至 k 桿質心之距離。

又，第 k 接點所承受之力 f_k 及扭矩 n_k 即

$$f_k = {}^{k+1} R^k f_{k+1} + F_k - m_k g_k + F_{bk} + F_{dk} + F_{lk} \quad (8)$$

$$n_k = {}^{k+1}R^k n_{k+1} + {}^k d_{k+1} \times ({}^{k+1}R^k f_{k+1}) \\ + {}^k d_{ck} \times F_k + T_k + {}^k d_{ck} \times (-m_k g_k + F_{dk} + F_{lk}) \\ + {}^k d_{bk} \times F_{bk} + T_{dk} + T_{lk}$$

其中 F_{bk} 為 k 桿所受之浮力， F_{dk} 為 k 桿所受之水阻力， F_{lk} 為 k 桿所受之昇力， T_{dk} 為 k 桿所受之水阻扭矩， T_{lk} 為 k 桿所受昇力所產生之扭矩， ${}^k d_{bk}$ 為 k 接點至 k 桿浮力中心之距離，假設質心不同於浮力中心。結合方程式 (6)、(7)、(9)，並且以向內遞迴(inward iteration)的方式推導各桿受力，我們可以將水下機械臂的動態模型用以下封閉性(closed-form)動力方程式表示，即

$$M^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + G^*(q) \\ + F(q, \dot{q}) + D(q, \dot{q}) = \tau \quad (10)$$

其中的 $M^*(q)$ 代表慣量矩陣，包括桿件原慣性矩、附加慣性矩等參數， $C^*(q, \dot{q})\dot{q}$ 為科氏力與向心力之扭矩向量， $G^*(q)$ 為重力之扭矩向量， $F(q, \dot{q})$ 為摩擦力扭矩向量， $D(q, \dot{q})$ 表示水阻扭矩向量， τ 為軸力矩向量(joint torque)， q 為角位移向量， \dot{q} 表示角速度向量。本研究中，我們不考慮摩擦力因素，因為該效應通常遠小於水阻力效應，若我們改善軸承之潤滑以減少其摩擦力影響。

(三) 系統辨識

系統辨識的理論基礎在於機械臂的動力方程式可以表示為其動力參數的線性組合 [8]，即

$$M^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + G^*(q) \\ + F(q, \dot{q}) + D(q, \dot{q}) \\ = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})x = \tau \quad (11)$$

其中 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 為回歸函數矩陣(regression function matrix)， x 為機械臂之動力參數，

如質量、慣性矩、水阻係數等參數。在 (11)

式中， $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 為角位移、角速度、與角加速的函數，因此必須獲得以上各物理量。其中之角位移可由編碼器獲得，而角速度則可藉數值微分獲得。角加速度則無直接量測之方式。通常為了避免角加速度之量測，相關的研究曾提出 filtered dynamic model [9]，supply energy model [7]，filtered power model 等方法。這些方法中，以 filtered dynamic model 較為準確，但也較繁複；而 supply energy model 利用系統能量可以表示動力參數的線性組合為基礎，避免了角速度的量測，需要加入積分計算。其缺點是較不準確，優點則是比 filtered dynamic model 簡單；而 filter power model 的優缺點則介於以上兩者之間。本研究採用較準確的 filtered dynamic model，估測的結果，再與參數的量測值相比較。其方法描述如下，首先對 (11) 式等式兩邊的函數分別乘以一個代表低通函數的轉移函數

$$f(s) = \frac{\lambda}{s + \lambda}, \text{ 其中}$$

$\lambda > 0$ 。所獲得的 filtered dynamic model 如下

$$\tau_f = Y_f(q, \dot{q})x \quad (12)$$

其中 $\tau_f = f(s)\tau$,

$Y_f(q, \dot{q}) = f(s)Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ ， x 為欲估測值之系統參數。本研究我們採用最小平方方法 (least-square algorithm)，將以下誤差函數最小化，以便求出參數估測值，即

$$J_k(x) = \frac{1}{2} e(k)^T e(k) + \frac{1}{2} [x - \hat{x}(0)]^T P(0)^{-1} [x - \hat{x}(0)] \quad (13)$$

其中 $e(k) = \tau_f(k) - Y_f(q, \dot{q})(k)\hat{x}(k-1)$ (14)

為了在取樣時間 $t=k$ 時的估測誤差， $\hat{x}(0)$ 表示初始估測值， $P(0) = p(0)^T > 0$ 為 covariant 矩陣，以上方法以疊代法求解公式如下

$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k-1) \\ + P(k-1)Y(k)^T [I + Y(k)^T P(k-1)Y(k)]^{-1} e(k) \quad (15)$$

$$P(k) = P(k-1) - P(k-1)Y(k)^T [I + Y(k)^T P(k-1)Y(k)^T P(k-1)]^{-1} Y(k) \quad (16)$$

我們首先將上方法應用於單軸水下機械臂的參數估測，以便於量測值比較。對於垂直模式可以由(5)式與(3)式得到

$$(I + I_a)\ddot{\theta} + d(mg - \rho Vg)\cos\theta + C_D \rho A \lambda^3 \dot{\theta}^2 = \tau \quad (17)$$

$$\text{因此可知 } M^*(q) = I + I_a \quad (18)$$

$$C^*(q, \dot{q}) = 0 \\ G^*(q) = d(mg - \rho Vg)\cos\theta \quad (19)$$

$$D(q, \dot{q}) = C_D \rho A \lambda^3 \dot{\theta}^2 \quad (20)$$

其中預估的參數包括附加慣性矩 I_a 和水阻扭矩係數 C_D (我們假設質心位置、桿長、質量、體積、面積等參數為精確值)。本研究在實驗設備方面，我們以交流伺服馬達 (SINANO model CB30-EF7) 驅動該單軸機械臂並且利用輸入參考電壓來控制馬達的輸入扭矩。為了使系統能完全辨識系統之全部參數，輸入扭矩必須符合所謂 persistently exciting trajectory 之條件。在本實驗中，我們以

$$\tau = 2.5(1 - e^{-0.8t}) + 3(\sin 12t + \cos(20t - 0.1)) \quad (21)$$

(N-m)

為輸入扭矩。

回歸函數過濾器的頻寬 λ 我們選定為 $\lambda = 15\text{Hz}$ ，此是根據以(21)式為機械臂輸入扭矩時之最大角速度約為 6 rad/s 而決定。系統的最大雷諾數約為 $56,175$ 。參數初始估測值選定為 $\hat{x}(0) = 0$ ，取樣時間間隔為 $h = 0.001\text{ (sec)}$ 。我們利用 filtered dynamic model 法則估測得到的系統參數值，並將 $t = 10\text{ (sec)}$ 時的值列於表一，與實驗量測值比較。我們發現利用此模型來估測系統參數相當準確，其誤差在 7% 左右。圖一中我們採用系統估測法所得的參數，對系統進行模擬 (open-loop simulation)。得到之結果顯示：模擬結果與實驗結果比較，二者之位移軌跡曲線非常吻合。

(四) 結論與討論

本研究中我們首先建立單軸水下機械

臂的動力模型，得知浮力，水阻力 (含水阻扭矩) 與附加質量 (含附加慣性矩) 等各項液力的數學模式；並且將該模型推廣至多軸水下機械臂，得到所謂的封閉性 (closed-form) 動力方程式。該封閉性動力方程式有助於我們窺得水下機械臂動力模型的結構。在系統參數估測方面，我們採用 filtered dynamic model 法則對單軸水下機械臂進行參數估測。實驗中的估測參數為附加慣性矩和水阻扭力係數。實驗所得到的結果顯示，以 filtered dynamic model 所得的估測值相當接近於直接量測值，其誤差約在 7% 。即使此誤差存在，我們發現以估測參數值進行動態模擬，其軌跡與實驗值相比較非常吻合。我們可以進一步推論，以系統參數估測法則所得到的估測值雖未必是該參數的精確值，但以整體系統進行模擬時，卻可以精確地描述該系統的動態行為。此外，本實驗的誤差所可能產生的原因包括 (1) 角速度值是由角位移經數值微分而得，而不是由實驗直接量測而得，(2) 本實驗中我們並未估測摩擦力，該力雖然在直接驅動的情況下很小，但仍可能造成誤差。

四、計畫成果自評

本計畫之研究成果自我評估如下：

- (一) 研究內容與原計畫相符程度說明：100%
- (二) 本研究達成預定目標概要：理論之推導及模式建立，實驗原型與系統建立，人才培育。
- (三) 本研究成果之學術參考價值：高
- (四) 本研究成果之應用推薦價值：高
- (五) 本研究成果可申請專利項目之說明：因屬於水下機械臂研究的部份成果，故尚未能申請專利。但未來經整合後，可申請發明專利。
- (六) 本專題計畫應再一步研究之需要性：本研究可進一步應用於水下機械臂之適應控制，並且加入摩擦力與水流力等變數之估測。
- (七) 本研究成果發表之建議：可發表於

內外期刊。

- (八) 綜評：本研究將系統參數估測法則應用於水下機械臂，有助於適應控制之線上參數估測，並獲得穩定與精確的控制器。
自評等第：佳

五、參考文獻

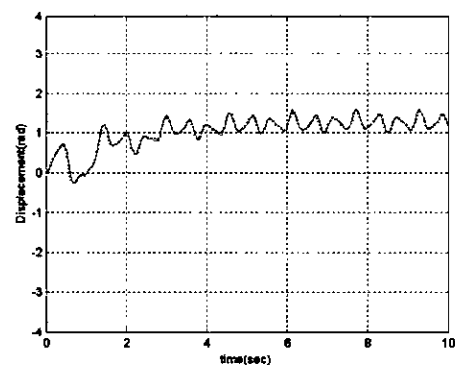
1. Mahesh, H., Yuh, J. & Lakshmmi, R., A coordinated control of an underwater vehicle and robotic manipulator, *J. Robotic System*, 8 (1991), 339-363.
2. Yoerger, D. R. & Slotine, J. J. E., Robust trajectory control of underwater vehicles, *IEEE J. Oceanic Engineering*, Oe10 (1985), 462-470.
3. Levesque, B. & Richard, M. J., Dynamic analysis of a manipulator in a fluid environment, *Intl. J. Robotics Research*, 13 (1994), 221-231.
4. McLain, T. W., Rock, S. M. & Lee, M. J., Experiment in the coordination of underwater manipulator and vehicle control, *Proceedings of Oceans '95 MTS/IEEE*, (1995), 1208-1215.
5. McLain, T. W., & Rock, S. M., Experiments in the hydrodynamic modeling of an underwater manipulator, *IEEE Conference Autonomous Underwater Vehicle Technology*, (1996), 463-469.
6. Lin, C.C., Chen, R.C., Li, T.L., and Chang, C.C., "Experimental Determination of The Hydrodynamic Coefficients of An Underwater Manipulator," *CSME Proceedings of The 14th National Conference on Mechanical Engineering (Control & Automation)*, (1997), pp. 315-321.
7. Prüfer, M., Schmidt, C., and Wahl, F., "Identification of robot dynamics with differential and integral models: a comparison," *Proceedings of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, San Diego, CA, (1994), Vol. 1, pp. 340-345.
8. Lu, Z., Shimoga, K. B., Goldenberg, A.

A., "Experimental Determination of dynamic parameters of robotic arms," *J. Robotic Systems*, 10(1993), 1009-1029.

9. Khalil, W., and Restrepo, P.P., "An efficient algorithm for the calculation of the filtered dynamic model of robots," *Proceedings of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, MN, (1996), pp. 323-328.
10. Kozlowski, K.R., and Dutkiewicz, P., "Experimental identification of robot and load dynamics," 13th IFAC World Congress San Francisco, CA, (1996), Vol. A, pp. 397-402.
11. Åström, K. J., Wittenmark, B., *Adaptive Control*, Addison-Wesley, MA, 1995.
12. Goodwin, G.C., and Sin, K.S., *Adaptive Filtering Prediction and Control*, Prentice-Hall, NY, 1984.

表一 動力參數值比較

	量測值	系統估測值	單位
I_a	0.0484	0.045	kg-m ²
C_D	0.3111	0.296	無



—— 實驗量測 - - - - 以估測值模

圖一 模擬與實驗之位移軌跡比較