

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

仿生型自主式水下載具阻力推進性能之研究

(Study on the Resistance and Propulsion Performance of Biomimetic Autonomous Underwater Vehicle)

計畫編號：NSC 89-2611-E-002-016

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：蔡進發 國立台灣大學造船及海洋工程學系

一、中文摘要

本研究將以數值計算與實驗並行的方式完成一仿生型自主式水下載具(Biomimetic Autonomous Underwater Vehicle)雛形模型的研發工作，包含以下的主要研究課題：(1)完成一低阻力特性魚體的幾何設計、(2)完成一高升力特性尾鰭(Caudal Fin)的幾何設計、(3)建立三維雷諾氏平均那維爾史托克求解程式(Reynolds Averaged Navier-Stokes Solver)求解三維魚體波動推進(Undulatory Propulsion)流場的似穩態解(Quasi-Steady Solution)、(4)由(2)的計算工具針對所設計的魚體外型配合子計劃五的基因演算法找出最低阻力最高推力的波動運動模式、(5)發展一二維非穩態雷諾氏平均那維爾史托克求解方程式、(6)利用(4)的計算工具計算尾鰭擺動推進(Fanning Propulsion)的流場，配合子計劃五的基因演算法，以其找到尾鰭的最佳運動模式、(7)製作一所含尾鰭及胸鰭(Pectoral Fin)(胸鰭的研究在另子計劃二)設計的魚體雛形、(8)製作一魚體雛形阻力與推進量測系統，其中包含前進方向的推阻力橫向力與搖擺力矩(Yawing Moment)、(9)進行所設計魚體及其相對運動模式的阻力與推進特性，一則以驗證計算結果，一則以量測其流場特性以做為後續研究的參考。

關鍵詞：仿生型自主式水下載具、擺動推進

Abstract

The numerical and experimental method will be used to develop a biomimetic autonomous underwater vehicle. The topics included are: (1) To design a low drag body shape, (2) To design a high lift caudal fin, (3) To develop a three dimensional Reynolds Averaged Navier Stokes Solver, (4) To find the optimum motion shape of body, (5) To develop a two dimensional unsteady RANS solver to calculate the flow field of fanning motion of caudal fin, (6) To find the optimum motion type of caudal fin, (7) To construct a prototype of the designed BAUV and (8) To conduct the resistance and propulsion test of the prototype.

Keywords: biomimetic autonomous underwater vehicle, Fanning Propulsion

二、緣由與目的

台大造船及海洋工程學系從事自主式水下載具“海敏一號”的研發工作，已研發一自主式水下載具原型，其中有關整體計劃的描述與阻力推進性能相關研究成果如參考文獻[1-9]，目前此載具正進行實海域的定位導航測試。在累積了三、四年的研發經驗後，對自主式水下載具的系統整合已有相當的信心後，研究群尋找實際應用的機會，開始與交通部科技顧問室合作，

進行港灣工程用無人水下載具系統”海影一號”及”海影二號”的研發工作，所示目前也已具雛形並正進行測試中[10-12]。

在水下載具的研發過程中衍生了一個重要的問題，那就是水下載具的速度一般均不高，以海敏一號而言最高速只有四節，而且這已接近目前所有研發中的水下載具的最高速度，在此速度下推進器螺槳的前進係數 $J = \frac{V_a}{ND}$ 均在0.5以下，在此前進係數下螺槳的效率也幾乎低於0.5，此與一般前進係數在1.0左右的螺槳其效率約為0.7至0.8，不可同日而語。這對需要自帶能源的自主式水下載具而言更是雪上加霜，因為自主式水下載具最重要的是要在水中維持長久的停留時間，而螺槳推進器在其前進係數下的低效率是水下載具性能的最大致命傷；另一個問題是水下載具需要在很低速下進行大角度的迴轉或是精準定位的工作，此時使用螺槳或控制翼面的運動行為又常常達不到所要求的精度，因此如美國MIT[13]、日本[14]等從事自主式水下載具的研究學者均轉向向海中的生物學習其推進及運動操縱的技巧，再回頭去改善自主式水下載具的推進與運動操縱性能。

自主式水下載具研究群為了克服水下載具在低速下的推進效率與運動操縱的問題。關於水中生物推進問題的研究最早有 Gray[15-17]的系列波動推進研究，Lighthill[18-19]與Wu[20-22]的理論研究，有Webb[23]魚體形態與推進的相關研究，這些研究均較偏向運動學與基礎的理論研究，Azuma[24]做了相當好的回顧與整理。

最近由於自主式水下載具的研發工作蓬勃發展，從事工程方面研究的學者也慢慢進入仿生推進運動的研究領域[25]，而在此方面的研究除了魚體流體動力的流場研究外，為了自主式水下載具的運動與操

縱性能需求，對尾鰭、胸鰭的研究也逐漸增加[14、26]。

水中生物的運動與目前人造的水下載具有幾點最大的區別：

(1)生物體為撓性(Flexible)，而一般的水下載具為剛體。(2)生物體的推進是採往復式的擺動推進(Undulatory or Oscillation)，而人造的水下載具採用螺槳推進是連續旋轉式。(3)生物體的推進與運動是互相耦合，而一般的水下載具是分開為不同功能的配備。

因此欲從事仿生型水下載具阻力與推進性能的研究，事實上即是要從事撓性體往復運動的流體動力研究。在本研究中將針對簡化魚體：魚體本身、尾鰭進行有關阻力、推進的研究。

三、流場計算方法

研究採用非壓縮性黏性流體的運動方程式雷諾氏平均那維爾史托克方程式(Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation)為基本方程式，此方程式如下：

$$\underline{E} \underline{q}_t < \underline{F}_x < \underline{G}_y < \underline{H}_z \quad \underline{N} \quad \underline{0} \quad (1)$$

$$\underline{E} \underline{N} \begin{matrix} s^{>2} & 0 & 0 & 0 \\ (1 < r) s^{>2} \underline{u} & 1 & 0 & 0 \\ (1 < r) s^{>2} \underline{v} & 0 & 1 & 0 \\ (1 < r) s^{>2} \underline{w} & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \quad (2)$$

$$\underline{q} = \begin{matrix} \underline{p}^* \underline{N} \underline{p} \\ \dots \\ \underline{u} \\ \underline{v} \\ \underline{w} \end{matrix}$$

$$\underline{F} = \begin{matrix} u \\ u^2 < p^* > \dagger_{xx} \\ uv > \dagger_{xy} \\ uw > \dagger_{xz} \end{matrix} \quad \underline{G} = \begin{matrix} v \\ vu - \dagger_{yx} \\ v^2 < p^* > \dagger_{yy} \\ vw - \dagger_{yz} \end{matrix} \quad (3)$$

$$\underline{H} = \begin{matrix} w \\ wu - \dagger_{zx} \\ wv - \dagger_{zy} \\ w^2 < p^* > \dagger_{zz} \end{matrix}$$

r 和 $s^{>2}$ 稱為前條件參數 (Preconditioned Parameters)[27], u, v, w 為對應座標軸 x, y, z 的流速分量, \dagger_{ij} 為剪應力的分量、 p 為壓力, \dots 為流體密度。上述方程式為疊代式雷諾氏平均那維爾史托克方程式求姐法所構成的方程式, 方程式採用人工壓縮係數法 (Artificial Compressibility) 求解非穩態壓縮方程式, 當疊代至非穩態項趨近於零時即可得到穩態非壓縮方程式的解。

方程式的求解在空間的離散採用格點中央 (Cell-Centered) 有限體積法 (Finite Volume Formulation), 在時間的向度的求解採用顯示一步五階的倫矩庫達時間步進法 (Explicit one-step five-stage Runge-Kutta time stepping scheme), 並採用多重格點 (Multigrid) 來加速收斂速度。

在魚體上邊界條件為：

$$(\vec{u} > \vec{v}) \vec{n} \vec{n} \vec{N} \vec{0} \quad (4)$$

其中 \vec{u} 是流場流體的速度, \vec{v} 是魚體擺動的速度。上游入流的邊界條件為：

$$\vec{u} \vec{N} U_0 \vec{i} \quad (5)$$

$$\vec{e} \vec{p} \vec{N} \vec{0} \quad (6)$$

下游的邊界條件為：

$$\vec{e} u_i \vec{N} \vec{0} \quad (7)$$

壓力則採用無反射邊界條件。

流場計算首先以二維翼為計算測試的對象, 計算領域的格點採用 C-H 格點, 其示意圖如圖一所示。目前程式正進行測試魚體邊界條件。

四、魚體幾何及運動方程式

魚體的幾何形狀與其生活習性所要求的功能息息相關, Webb[22]的研究依其運動性能大分為三類: 第一種是瘦(細)長形魚體, 適於高加速的形體如梭魚(Pike); 第二類是流線形的魚體, 適於長程洄游的形體如鮪魚(Tuna); 第三類為寬扁形的魚體, 適於運動操縱的形體如熱帶魚(Banded Butterfly Fish)。本研究的目標是以定位及低速徘徊的自主式水下載具為研發對象, 同時考慮容易取得與觀察實體的生態, 因此決定以鯉魚與錦鯉為本研究仿生的對象。

有關錦鯉魚體的幾何資料如圖二所示為其側面幾何, 圖三為其背面幾何資料, 圖四為取得剖面資料後重建的魚體立體幾何。

關於魚體的運動姿勢目前已完成錄影的工作, 正進行影像分析以取得其運動時身體的擺動方程式。

五、討論

本計劃本年度的主要工作有以下幾項：

1. 參考魚體實體, 及低阻翼形, 設計一魚體幾何。目前已建構出一魚體幾何如圖二至四所示。
2. 設計尾鰭, 有部份的研究尾鰭直接採用 NACA 的對稱翼形。錦鯉的尾鰭厚度相當薄可以使用平板來取代即可, 在實務上也比較可行理論上可以用翼形來設計。

3. 發展黏性流場計算程式，使其適於計算魚體的穩態解，計算魚體不變形的流場，比較出低阻的外形。目前程式正在測試中。
4. 建構一透明水箱，以高速錄影機拍攝活魚波動、擺動的實況，分析其運動時魚體與尾鰭的運動軌跡。目前已完成錄影的工作正進行影像數位化擷取與分析的工作，魚體運動的姿勢如圖五所示。

五、參考文獻

1. 蔡進發, "高操控性自主式水下載具之外形設計及其阻力推進性能之研究", 國科會海下技術學門研究成果發表會, pp.41-46, 1994.
2. 黃正利, 蔡進發, 關宗凱, "自主式水下載具之推進系統設計與解析", NTU-INAOE Tech. Report 477, 1995, 6.
3. Guo, J., Tsai J.F., F.C. Chiu, " Design, Simulation and Control of a Highly Maneuverable Autonomous Underwater Vehicle Testbed", MARIENV'95, Sep.24-29, Tokyo, Japan, 1995.
4. 郭振華、蔡進發, "水下自動載具推進器之推力控制實驗", 第八屆中國造船暨輪機工程研討會, pp.367-373, 1995.
5. 蔡進發, "高操控性自主式水下載具之外形設計及其阻力推進性能之研究", 國科會研究報告, 1996年8月。
6. 蔡進發, "自主式水下載具之外形設計及其阻力推進性能之研究", 第十八屆海洋工程研討會, 1996年11月, 台大工學院。
7. Guo J., J.F. Tsai, F.C. Chiu and S.W. Cheng, "A Basic Study on the Design of an Autonomous Underwater Vehicle", 第十三屆機械工程學會學術研討會, 1996, 11月, pp.457-464.
8. 鄭勝文、邱逢琛、蔡進發、郭振華, "自主式水下載具整合型研究計劃成果報導", 國科會科學發展月刊, 1998, pp.6-20.
9. 郭振華、鄭勝文、邱逢琛、蔡進發, "無人水下載具整合型導航系統之設計及實驗", 水下工程研討會, 1998。
10. 郭振華、邱逢琛、鄭勝文、蔡進發, "自主式水下載具在交通部業務應用之可行性研究", 交通部研究報告, 1997年1月。
11. 郭振華、鄭勝文、邱逢琛、蔡進發, "港灣工程用無人水下載具系統之研究 2/3", 交通部科技顧問室, 1998, 10月。
12. 郭振華、鄭勝文、邱逢琛、蔡進發, "港灣工程用無人水下載具系統之研究 3/3", 交通部科技顧問室, 2000, 3月。
13. G.Kuiper, "The Wageningen Propeller Series," MARIN Pub.92-001, 1992.
14. Triantafyllou and D.K.P. Yue, " Fluid Mechanics and Robotic of Fish-like Locomotion," Tenth International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, ONR, 1997.
15. Kato, N. and Inaba, T., "Control Performance of Fish Robot with Pectoral Fins in Horizontal Plane," Underwater Technology 98, Tokyo, 1998.
16. Gray, J. , "Studies in Animal Locomotion : The Movement of Fish with Special Reference to the Eel," Journal of Experimental Biology, 10:88-104, 1933.
17. Gray, J. , "Studies in Animal Locomotion : The Relationship Between waves of Muscular Contraction and the

- Propulsive Mechanism of the Eel," Journal of Experimental Biology, 10:386-390,1933.
18. Gray, J. ,"Studies in Animal Locomotion : The propulsive Mechanism of the Whiting," Journal of Experimental Biology, 10:391-400,1933.
 19. Lighthill, M.J.," Hydromechanics of Aquatic Animal Propulsion," Ann. Rev. Fluid Mech. 1:413-446, 1969.
 20. Lighthill, M.J., " Aquatic Animal Propulsion of high Hydromechanical Efficiency," J. Fluid Mech., 44:265-301, 1970.
 21. Wu, T.Y., "Swimming of a Waving Plate", Journal of Fluid Mechanics, Vol.10,pp.321-344, 1961.
 22. Wu, T.Y., "Hydromechanics of Swimming Propulsion. Part 1. Swimming of a Two-Dimensional Flexible Plate at Variable Forward Speeds in an Inviscid Fluid," Journal of Fluid Mechanics, Vol.46, Part 2, pp.337-355, 1971.
 23. Wu, T.Y., "Hydromechanics of Swimming Propulsion. Part 3. Swimming and Optimum Movements of Slender Fish with Side Fins," Journal of Fluid Mechanics, Vol.46, Part 3, pp.545-568, 1971.
 24. Webb, P.W.,"Form and Function in Fish Swimming," Scientific American, 251(1), 1984, pp.58-68.
 25. Akira, Azuma, "The Biokinetics of Flying and Swimming," Springer-Verlag, Tokyo, 1992.
 26. ONR, "Proceeding of the Special Session on Bio-Engineering Research Related to Autonomous Underwater Vehicles," UUST, 1997.
 27. Westneat M.W. and walker, J.A.," Applied Aspects of mechanical Design, Behavior, and Performance of Pectoral Fin Swimming in Fishs," Tenth International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, ONR, 1997.
 28. J.F.Tsai,C.H. Sung,M.J.Griffin and T.T. Huang," Effects of Grid Resolution on Axisymmetric Stern Flows Computed by an Incompressible Viscous Flow Solver," Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol.19, No.4,pp.429-438,1996.
 29. C.H.Sung, J.F. Tsai, T.T. Huang and W.E. Smith,"Effects of Turbulence Models on Axisymmetric Stern Flows Computed by an Incompressible Viscous Flow Solver", The Sixth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Iowa City, Iowa, Aug., 1993.
 30. Barrett, D. Grosenbaugh, M. and Triantafyllou, M.,"The Optimal Control of a Flexible Hull Robotic Undersea Vechile Propelled by an Oscillating Foil," AUV'96 IEEE, 1996,pp1-9.
 31. Yates, G.T., "Hydromechanics of Body and Caudal Fin Propulsion," Chapter 5 of "Fish Biomechanics," Edited by P.W. Webb and D. Webb, Praeger, 1983.
 32. Chorin, A. J., " A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems", Journal of Computational Physics, Vol.2, pp.12-26 (1976).

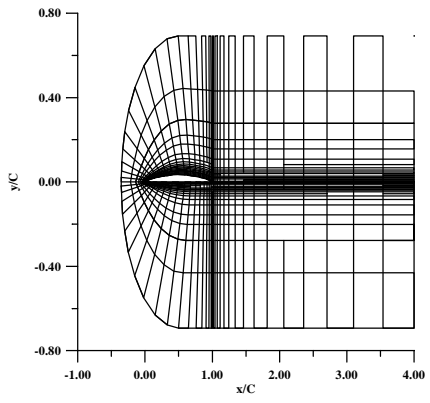
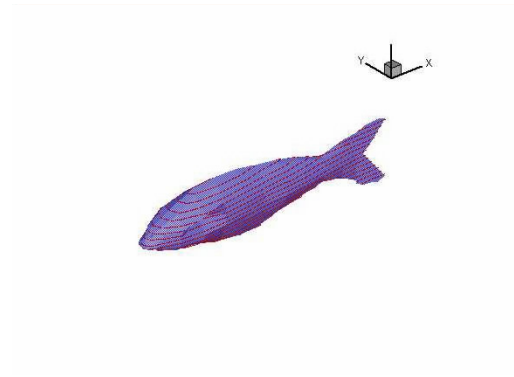
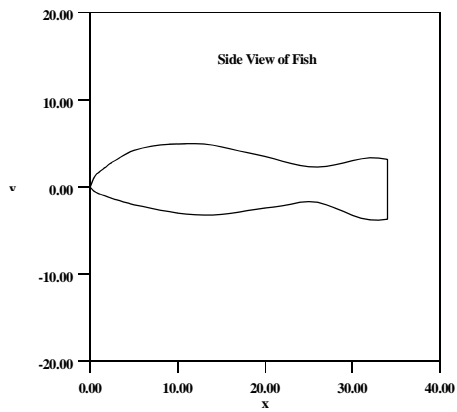


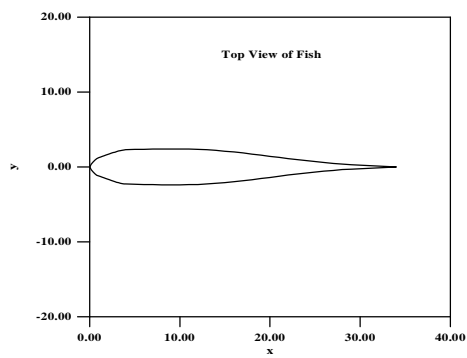
圖 1：流場計算示意圖



圖四：錦鯉魚體重建立體圖



圖二：錦鯉側面圖



圖三：錦鯉上視圖