

行政院國家科學委員會專題研究計畫期末報告

仿生型自主式水下載具運動性能之研究(III)

Study on the Motions of Biomimetic AUVs (III)

計畫編號: NSC90-2611-E-002-042

執行期限: 90年8月1日至91年7月31日

主持人: 邱逢琛 台灣大學工程科學及海洋工程學系

計畫參與人員: 郭振華 台灣大學工程及海洋工程學系
陳紀綱 台灣大學工程及海洋工程學系

一、中文摘要

本群體計畫擬從模仿魚類運動著手,以期探究出提升自主式水下載具低速徘徊運動操控性能、高速巡航推進效率的新方法,為達此目標台大正在發展仿生自主式水下載具試驗機(BAUV testbed),而為了能掌握該試驗機的運動性能,本子計畫於前二期中研發了一個模擬撓性細長體波動推進運動的實用方法,並以該模擬計算程式探討了發展中的仿生自主式水下載具試驗機的前進運動特性。

為了能進行模擬以胸鰭推進或操縱的魚體運動,本期研究重點即在於建構模擬胸鰭運動流體力學特性的數學模式。本研究基本上是依循翼元法(Blade element theory)的基本假設,視胸鰭為多數翼元的組合,各翼元運動引致的升力、橫流阻力(cross flow drag)以及附加慣性力皆以二維振動薄翼流體動力模式先在胸鰭固定座標系中予以估算,並轉換至魚體固定座標系之後再積分出胸鰭整體的流體動力。本研究所示計算例與Kato的實驗和計算比較結果顯示出頗為一致的趨勢,確認本研究所提出的胸鰭運動數學模式,作為仿生自主式水下載具運動模擬工具上的實用性。

關鍵詞: 仿生、自主式水下載具、胸鰭運動、開合、翻轉

Abstract

For predicting the dynamic characteristics of a fishlike AUV testbed, which is under developing in National Taiwan University, we developed a practical mathematical model to evaluate the hydrodynamic forces of a pectoral fin rowing. Basically, the assumptions of Blade Element Theory is followed and the fin is treated as a number of moving blade elements. The lift, cross flow drag as well as added inertia acting on each blade are evaluated as a two dimensional oscillating thin foil and they are described in the fin-fixed coordinate. These forces are transferred to the fuselage-fixed coordinate and then integrated to obtain the total forces acting on a pectoral fin. The calculated results of the research are compared with the model tests and calculation carried out by Kato. The agreement confirmed that the presented mathematical model is a practical tool

for simulating the locomotion and maneuvering motion of a fishlike AUV in pectoral fin rowing motion.

Keywords: Biomimetics、Autonomous Underwater Vehicle、Pectoral Fin Motion、Fearthing、Lead-lag

二、前言

近年來在海洋科學研究、軍事用途或商業應用上,自主式水下載具(AUV)愈來愈受到矚目,而現有的自主式水下載具大多是以電動馬達帶動螺旋旋轉作為推進方法。而另一方面,在AUV領域裡也普遍認知經由自然界的天擇而仍存在的魚類,其力學系統具備了高效率的推進、操控以及敏捷性。因此,為了獲得像魚類一般優雅的徘徊、精確到位以及敏銳的迴旋能力,AUV的推進系統必須能快速而順暢的交互產生正向或負向推力,而這卻是傳統上採用螺旋系統所難達到的。

為了探索仿生技術應用在AUV的可行性,台大正研發一仿魚型水下載具試驗機(BAUV)以探討其外型、運動、行為與感知等向互間之效應。該仿魚載具胴體內部是由一些關節與連桿組成,藉由其撓性可做波動推進,此外尚有可控的左右胸鰭,協助低速時的推進與操控,如圖1所示。為了胸鰭系統及控制器設計上的需要,建構可模擬胸鰭運動推進的實用模擬計算工具是有助益的,而此一工具的關鍵又在於胸鰭運動引致流體動力模式的建構上。



圖一 台大 BAUV 測試機的右側胸鰭

對於魚體胸鰭推進的研究,早期有Webb & Blake提出的 Blade-element Theory, Blake 探討胸鰭運動

的推進行程(Power stroke)及回收行程(Recovery stroke)的力學機制[1,2,3]，以及 Webb & Blake 探討 lift-based 推進機制[4,5]。近期有 Kato 利用非定態渦格法的理論計算以及模型試驗分析探討胸鰭運動的流體動力特性的研究[6]。

本子計畫的系列研成果，已於前一篇論文中[7]，提出在細長體假設下的一實用計算法以模擬仿魚 AUV 的波動推進運動。將撓性細長體視為許多分段(element)的組合，而魚體波動時波從鼻端往尾部傳遞，考慮作用在每一分段的流體反作用力包含動量變化、摩擦力、橫流阻力(cross flow drag)。運動方程式是以物體固定座標系描述，以積分各分段的縱向力、側向力及平擺力矩而得。方程式在時間域以 Newmark-β法逐步求解，解得的運動速度並轉換至空間固定座標系後積分得軌跡。而在實際的數值計算求解過程中，該文採用人工彈簧以抑制側移與平擺運動的飄移。並於後續的研究中，基本上延續前述的數學模式，但是在實際的數值計算求解過程中，採用數值濾波技巧濾掉低頻成分以避免側移與平擺運動飄移造成解的發散，因此而能獲得穩定的解。並以此一實用計算法，進行系列計算，探討了發展中的仿生自主式水下載具試驗機的運動特性[8]。

本期研究即在上述基礎上，企圖建構模擬胸鰭運動流體力學特性的數學模式。作為研究成果的初步驗證，本研究所示計算例將與 Kato 的實驗和計算做比較，以期至少能初步確認本研究提出的胸鰭運動數學模式，作為仿生自主式水下載具運動模擬工具上的實用性。

三、數學模式

3.1 座標系

本文以右側胸鰭為準，定義三個座標系如下：即魚體固定座標系 $o-xyz$ (global)， o 置於鼻端， x 向前， y 向左， z 向上以及以轉軸為原點的魚體固定座標系 $s-xyz$ 如圖 2(a)所示，以及以轉軸為原點的胸鰭固定座標系 $s-x'y'z'$ (local)，如圖 2(b)所示。 $x'-z'$ 平面與鰭面平行， y' 軸垂直鰭面。胸鰭轉軸點 s 以魚體固定座標系描述之位置向量為 (x_s, y_s, z_s) ，鰭的某一個翼元(blade element)的中心點以胸鰭固定座標系 $s-x'y'z'$ 描述為 $(x', 0, z')$ ， i blade 的弦長(chord length)為 c_i ，鰭的最大弦長為 c 。

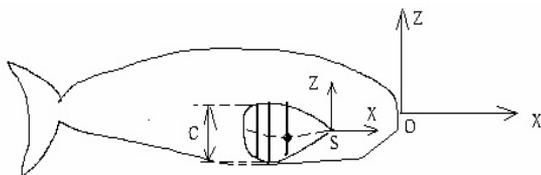


圖 2(a) 整體座標系

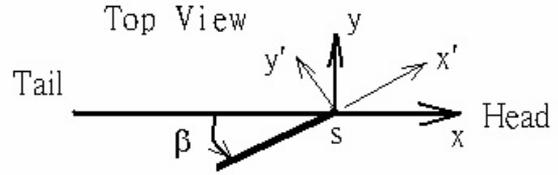


圖 2(b) 局部座標系及開合角

3.2 胸鰭運動模態

從自然界魚類運動的觀測和分析 [6][7]知其胸鰭運動通常包含開合(Lead-lag)和翻轉(Feathering)兩種運動模態的組合。圖 2(b)所示 β 即為繞 z 軸旋轉的開合角(Lead-lag angle)，而圖 3 所示 α 則為繞 y 軸旋轉的翻轉角(Feathering angle)。以黑鱒為例，魚體前進時， β, α 通常不超過 80 度， β 小表示鰭面較貼向胴體， β 增大表示鰭面張開，而 $\alpha=0$ 時表示鰭面平行 z 軸， α 增大表示鰭面上翻。圖 3 的 z_i 表示 i blade 弦長的頂視投影長度(平行於 $x-y$ 平面)。

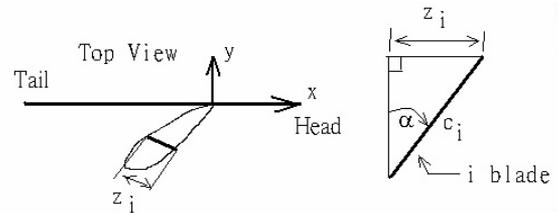


圖 3 翻轉角

3.3 胸鰭運動的數學描述

本研究分別依(1)式及(2)式描述開合角及翻轉角的時間歷程：

$$\beta = \beta_{ave} + \beta_a \cos \omega t \quad (1)$$

$$\alpha = \alpha_{ave} + \alpha_a \cos(\omega t + \Delta\phi) \quad (2)$$

上式中， β_{ave} ：平均開合角， β_a ：開合角振幅， $\omega = 2\pi/T$ ：角頻率， T ：週期， α_{ave} ：平均翻轉角， α_a ：翻轉角振幅， $\Delta\phi$ ： α 相對於 β 的相位領先(Phase lead)。

3.4 座標系之間的向量轉換關係式

$s-xyz$ 系與 $s-x'y'z'$ 系之間有轉換關係式如下，即

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} &= L \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha & \sin \beta & -\cos \beta \sin \alpha \\ -\sin \beta \cos \alpha & \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

或

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} &\equiv L^{-1} \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = L^T \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha & -\sin \beta \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ -\sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

3.5 i blade 中心點的運動速度

若用胸鰭轉軸為原點的魚體固定座標系 s-xyz 描述 i blade 中心點相對於轉軸點 s 的運動速度，則可表為

$$\vec{V}_i^s = \vec{\omega} \times \vec{r}_i \quad \text{而} \quad \vec{r}_i = L^{-1} \vec{r}_i' \quad , \quad \text{亦即}$$

$$\vec{V}_i^s = \vec{\omega} \times \vec{r}_i = \vec{\omega} \times L^{-1} \vec{r}_i' \quad . \quad \text{而}$$

i blade 中心點時時刻刻以 s-xyz 描述之位置向量為 \vec{r}_i ，即

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha & -\sin \beta \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ -\sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i' \\ 0 \\ z_i' \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} x_i' \cos \beta \cos \alpha + z_i' \sin \alpha \\ x_i' \sin \beta \\ -x_i' \sin \alpha \cos \beta + z_i' \cos \alpha \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

代入即得

$$\begin{aligned} \vec{V}_i^s &= \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & \dot{\alpha} & \dot{\beta} \\ x_i & y_i & z_i \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\alpha} z_i - \dot{\beta} y_i \\ \dot{\beta} x_i \\ -\dot{\alpha} x_i \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} -x_i' \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta + z_i' \dot{\alpha} \cos \alpha - x_i' \dot{\beta} \sin \beta \\ x_i' \dot{\beta} \cos \beta \cos \alpha + z_i' \dot{\beta} \sin \alpha \\ -x_i' \dot{\alpha} \cos \beta \cos \alpha - z_i' \dot{\alpha} \sin \alpha \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

其次，魚體平移速度向量以魚體固定座標系表示為 $(u(t), v(t), 0)$ ，旋轉角速度向量為 $(0, 0, \dot{\psi}(t))$ 。則點 s 因魚體運動引致之速度以 o-xyz 描述則為

$$\vec{U}_s = \begin{Bmatrix} u - \dot{\psi} y_s \\ v + \dot{\psi} x_s \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

於是，i blade 中心點相對於水的平移速度以 o-xyz 描述即為 $\vec{V}_i = \vec{V}_i^s + \vec{U}_s$

$$\vec{V}_i = \begin{Bmatrix} -x_i' \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta + z_i' \dot{\alpha} \cos \alpha - x_i' \dot{\beta} \sin \beta + u - \dot{\psi} y_s \\ x_i' \dot{\beta} \cos \beta \cos \alpha + z_i' \dot{\beta} \sin \alpha + v + \dot{\psi} x_s \\ -x_i' \dot{\alpha} \cos \beta \cos \alpha - z_i' \dot{\alpha} \sin \alpha \end{Bmatrix}$$

(8)

而此平移速度若以胸鰭固定座標系 s-x'y'z' 描述，則為 $\vec{V}_i' = L \vec{V}_i$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha & \sin \beta & -\cos \beta \sin \alpha \\ -\sin \beta \cos \alpha & \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \\ &\begin{Bmatrix} -x_i' \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \beta + z_i' \dot{\alpha} \cos \alpha - x_i' \dot{\beta} \sin \beta + u - \dot{\psi} y_s \\ x_i' \dot{\beta} \cos \beta \cos \alpha + z_i' \dot{\beta} \sin \alpha + v + \dot{\psi} x_s \\ -x_i' \dot{\alpha} \cos \beta \cos \alpha - z_i' \dot{\alpha} \sin \alpha \end{Bmatrix} \\ &\equiv \begin{Bmatrix} V_{ix}' \\ V_{iy}' \\ V_{iz}' \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

其中，x 成分係平行鰭面翼元排列方向，只有摩擦力，假設微小可忽略。本研究之模式主要只考慮垂直翼元的 y 成分速度，和平行翼元的 z 成分速度。

3.6 翼元的流體動力模式

本研究假設 i blade 為二維振動薄翼，其流體動力模式採用如下述。

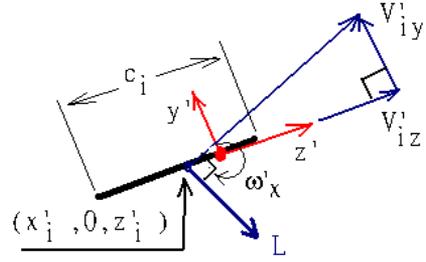


圖 4 二維振動薄翼的流體動力模式

i blade 因循環(circulation)產生的升力 L_i 可表示如下式：

$$L_i = \frac{1}{2} \rho V_{iz}'^2 c_i \cdot 2\pi \left(\frac{V_{iy}'}{V_{iz}'} \right) C(\kappa) \quad (10)$$

上式中， $C(k)$ 為 Theodorsen function，由於胸鰭運動之無因次頻率 k 如前述可達 4~10，因此本研究

之模式取 $C(k)=0.5$ 。圖 4 中，定義 $\gamma_i = \tan^{-1} \frac{V_{iy}'}{V_{iz}'}$ ，

於是 L_i 在 z' 的分量及在 y' 的分量分別為 $L_{iz'} = L_i \sin \gamma_i$ ， $L_{iy'} = -L_i \cos \gamma_i$ (11)

此外，本研究尚考慮作用在 y' 方向的 cross flow drag 以及非循環的附加慣性力

$$L_{iy'} = -\pi \rho \left(\frac{c_i}{2} \right)^2 \dot{V}_{iy}' - \frac{1}{2} \rho V_{iy}' |V_{iy}'| c_i \cdot C_d \quad (12)$$

上式中, C_d 取 2.0。於是, 先取(11)式及(12)式的和, 再轉換到 s-xyz 座標系, 則流體動力在 x, y, z 的分量分別為

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} L_{ix} \\ L_{iy} \\ L_{iz} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha & -\sin \beta \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ -\sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ L_{iy'} \\ L_{iz'} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} -L_{iy'} \sin \beta \cos \alpha + L_{iz'} \sin \alpha \\ L_{iy'} \cos \beta \\ L_{iy'} \sin \alpha \sin \beta + L_{iz'} \cos \alpha \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

此力量對轉軸為原點的魚體固定座標系的原點 s 的力矩 M_{is} 在 x,y,z 的分量為

$$\vec{M}_{is} = \vec{r}_i \times \begin{Bmatrix} L_{ix} \\ L_{iy} \\ L_{iz} \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_i & y_i & z_i \\ L_{ix} & L_{iy} & L_{iz} \end{vmatrix} = \begin{Bmatrix} L_{iz} y_i - L_{iy} z_i \\ L_{ix} z_i - L_{iz} x_i \\ L_{iy} x_i - L_{ix} y_i \end{Bmatrix} \quad (14)$$

而對鼻端為原點的魚體固定座標系的原點 o 的力矩 M_{io} 在 x,y,z 的分量則為

$$\begin{aligned} \vec{M}_{io} &= (\vec{r}_i + \vec{r}_s) \times \begin{Bmatrix} L_{ix} \\ L_{iy} \\ L_{iz} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_i + x_s & y_i + y_s & z_i + z_s \\ L_{ix} & L_{iy} & L_{iz} \end{vmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} L_{iz} y_i - L_{iy} z_i \\ L_{ix} z_i - L_{iz} x_i \\ L_{iy} x_i - L_{ix} y_i \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} L_{iz} y_s - L_{iy} z_s \\ L_{ix} z_s - L_{iz} x_s \\ L_{iy} x_s - L_{ix} y_s \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

3.6 胸鰭整體作用在魚體固定座標系的原點 o 的力與力矩

於是, 將(15)式表示的所有翼元的力與力矩積分即得胸鰭整體作用在魚體固定座標系的原點 o 的力與力矩如下式,

$$\begin{Bmatrix} F_{sx} \\ F_{sy} \\ F_{sz} \\ G_{sx} \\ G_{sy} \\ G_{sz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_i L_{ix} \\ \sum_i L_{iy} \\ \sum_i L_{iz} \\ \sum_i (L_{iz} y_i - L_{iy} z_i) + F_{sz} y_s - L_{sy} z_s \\ \sum_i (L_{ix} z_i - L_{iz} x_i) + L_{sx} z_s - L_{sz} x_s \\ \sum_i (L_{iy} x_i - L_{ix} y_i) + F_{sy} x_s - F_{sx} y_s \end{Bmatrix} \quad (16)$$

上式表示的水平力與平擺力矩即可加入以魚體固

定座標系描述的水平運動方程式之中, 進行運動模擬。而本研究的重點則在於必須先行確認本節所提出的流體動力數學模式的合理與適用性。

四、數值計算與驗證

4.1 胸鰭幾何外形

作為本研究計算例的胸鰭, 其翼展 330.0mm, 而弦長為 196.8mm, 形狀如圖 5 所示。

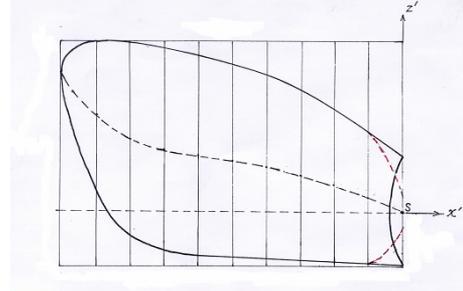


圖 5 BAUV 右側胸鰭外形

轉軸點 s 在以 BAUV 鼻端為原點的魚體固定座標系的座標為 (-420.0, -190.5, -88.4), 單位為 mm。本研究實際計算時, 將鰭視為 10 個翼元的組合。圖中虛線所示即為各翼元中點的連線。

4.2 胸鰭運動參數

為了與 Kato 的實驗及計算[6]做定性上的比較確認, 本研究的計算設定胸鰭運動為相同的無因次頻率 $k=4.0$ 。定義 $k=c\omega/u$, 因 $c=196.8\text{mm}$, 因此取 $T=5.0\text{ sec}$, $u=61.8\text{ mm/sec}$ 。至於胸鰭運動振幅亦取相同的 $\beta_{ave}=55\text{deg}$, $\beta_a=35\text{deg}$, $\alpha_{ave}=35\text{deg}$, $\alpha_a=35\text{deg}$, $\Delta\phi=-180\text{deg}\sim+180\text{deg}$ 每間隔 30 deg。

4.3 力與力矩的無因次化

為了計算結果顯示與比較之便, 本研究依循 Kato[6]相同的方式, 定義胸鰭運動引致的流體動力與力矩的無因次係數如下:

$$C_x = F_{sx} / (0.5\rho u^2 S) \quad (17)$$

$$C_{Gy} = G_{sy} / (0.5\rho u^2 S c) \quad (18)$$

其他 C_y, C_z 皆與(17)式, C_{Gx}, C_{Gz} 亦皆與(18)式類同。式中 S 為胸鰭投影面積。ρ為流體密度。

4.5 模擬計算結果

為了與 Kato[6]的文獻比較, 計算係以胸鰭轉軸點為準, 亦即令 $(x_s, y_s, z_s)=(0,0,0)$, 進行本計算。先以相位角 60 度為例, 依序顯示水平方向的無因次流體動力係數 C_x, C_y, C_{Gz} 以及垂直方向的無因次流體動力係數 C_z, C_{Gy} 等的時間歷程於圖 6。計

算時的胸鰭運動參數如 4.2 節所述。圖中所顯示的時間歷程，與 Kato[6] 文獻中圖 14 所示的 C_x, C_y, C_z 的實驗和計算結果相較，不僅在相位關係上一致（註：Kato 的 y 、 z 軸方向定義與本研究相反，需注意。另外，Kato 於圖中只顯示 C_x, C_y, C_z ），而且定量上亦頗為相當。從 C_x 的時間歷程可知 x 向推進力最大是發生在最大 β 的稍後，而 β 變小的行程中會發生正向推力，此即 power stroke，且其最大值大於 β 變大的 recovery stroke 所發生的阻力最大值，其結果會使一週期的平均值為正，亦即產生正向平均推力。上述相位關係，在本研究的計算以及 Kato 的實驗和計算皆顯示一致的結果。

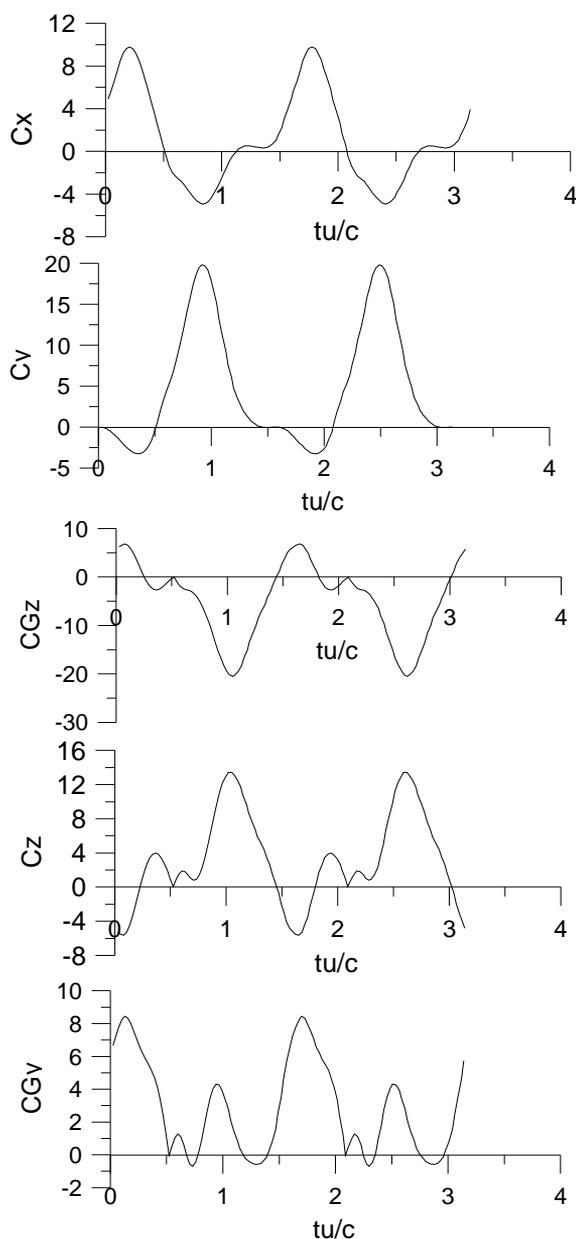


圖 6 相位角 60 度的流體動力係數時間歷程

其次，圖 7 顯示 α 領先 β 不同相位角時，一週期平均各無因次流體動力係數的變化。圖中依序顯示的結果，與 Kato[6] 文獻中圖 15~圖 19 所示對應的 $C_x, C_y, C_{mz}, C_z, C_{my}$ 的實驗和計算結果相較，雖然垂直方向的平均無因次流體動力係數 C_z, C_{Gy} 的變化稍有差異，但水平方向的平均無因次流體動力係數 C_x, C_y, C_{Gz} 隨相位角的變化則同樣不僅在相位關係上大體一致，在定量上亦大致相當。譬如在 C_x ，本計算顯示相位角在 30 度~170 度之間發生正向推力，與 Kato 顯示在 30 度~120 度之間發生正向推力，其趨勢大體相符，而發生最大後退力的相位差則同樣都在 -90 度附近。

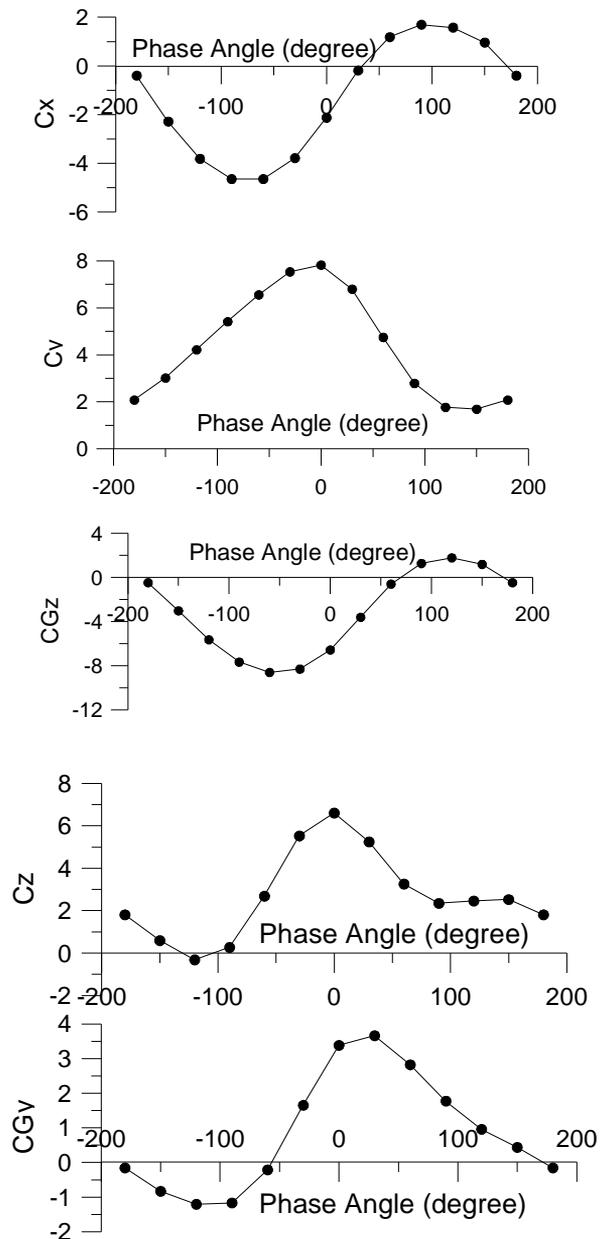


圖 7 平均流體動力係數隨相位差之變化

五、結論

為了掌握台大正在發展中的仿魚 AUV 測試機的運動特性，及作為運動控制器設計的應用工具，本計畫系列研究，在之前已發展了一個可模擬撓性細長體波動推進的實用計算法。在此基礎上，為了能進一步進行以胸鰭推進或操縱的魚體運動模擬，本期研究基本上依循翼元法(Blade element theory)的基本假設，視胸鰭為多數翼元的組合，各翼元運動引致的升力、橫流阻力(cross flow drag)以及附加慣性力皆以二維振動薄翼流體動力模式先在胸鰭固定座標系中予以估算，並轉換至魚體固定座標系之後再積分出胸鰭整體的流體動力。本研究所示計算例與 Kato 的實驗和計算比較結果顯示出頗為一致的趨勢，初步確認了本研究提出的胸鰭運動數學模式，作為仿生自主式水下載具運動模擬工具上的實用性。

由於本研究的胸鰭外形與 Kato 使用的並不全然相同，且其顯示的實驗與計算例亦有限，因此仍有待今後自行完成水槽實驗，以作為進一步的驗證或模式改進的依據。

六、參考文獻

- [1] Blake, R.W., "Influence of pectoral fin shape on thrust and drag in labriform locomotion", *J. Zoo. Lond*, vol.194, pp.53-66, 1981
- [2] Blake, R.W., "Mechanics of drag-based mechanisms of propulsion in aquatic vertebrates. In *Vertebrate locomotion*", Symp. Zool. Soc. Lond. Vol.48, pp.29-52, 1981
- [3] Blake, R.W., "Fish Locomotion", Cambridge university Press, 1982
- [4] Webb, P.W., and Blake, R.W., "Swimming. In *Functional Vertebrate Morphology*", edited by Hildebrand, M. Harvard University Press, 1983
- [5] Blake, W.R., "Median and paired fin propulsion. In *Fish Biomechanics*", edited by Webb, P.W., and Weihs, D., Praeger Publishers, 1983
- [6] Kato, N., and Inaba, T., "Hydrodynamic characteristics of apparatus of pectoral fin motion", 日本造船學會論文集 182 號, pp.129-139, 1997
- [7] Chiu, F.C., Wu, C.P. and Guo, J., "Simulation on the undulatory locomotion of a flexible slender body", 1st International Symposium on Aqua Bio-Mechanisms, pp.185-190, Honolulu, 2000.
- [8] Chiu, F.C., Guo, J., Chen, J.G., Lin, Y.H., "Dynamic characteristics of a biomimetic underwater vehicle", 2002 International Symposium on Underwater Technology, Tokyo, 2002