

影像技術評估魚類在不同福祿數之游動行為

Investigation of Fish Swimming Performance in Different Froude Numbers by Video Techniques

虞 淨 卉*

CHING-HUI YU

國立台灣大學生物環境系統工程學研究所

碩士

張 文 亮

WEN-LIAN CHANG

國立台灣大學生物環境系統工程學研究所

教授

摘 要

本研究以雙鏡頭佐以簡單數學運算，設計出能量測魚體長度與魚隻吻部XYZ座標之非侵入性監測方法。於水工實驗渠道中量測台灣馬口魚與尼羅口孵魚(吳郭魚)之長度與游速，魚隻長度平均誤差百分比最高為9.47% (1.23公分)；最低為4.19% (0.18公分)。同時計算魚隻於不同流速下之魚尾擺動頻率，以推算在野生環境下，不同魚種適應福祿數之最高值；研究發現體長較小的魚需要更高的魚尾擺動頻率來維持穩定，而台灣馬口魚比尼羅口孵魚更適合高流速環境。

最後以增加流速法，量測兩種魚之臨界游速：台灣馬口魚之臨界流速介於0.39 m/s至0.74 m/s之間；尼羅口孵魚之臨界流速介於0.30 m/s至0.46 m/s之間，以上結果可提供本土魚種生態工程的設計參數依據。

關鍵詞：台灣馬口魚，尼羅口孵魚，影像監測，雙鏡頭，魚尾擺動頻率，臨界游泳速度。

ABSTRACT

This study used bi-camera method and simple mathematical operation as a non-invasive monitoring method to develop a XYZ-coordinates to calculate the fish length and fish swimming speed. The lengths and swimming speeds of *Candidia barbata* and *Oreochromis niloticus niloticus* were estimated by bi-camera method in the modeling channel. The maximum error was 9.47% (1.23 cm), and the minimum error was 4.19% (0.18 cm). The experiment determined the tail-beat frequency in different velocities to estimate the maximum adapting Froude number for two fish species when they were in the field. The result showed that the small fish needed high tail-beat frequency to make the body in a stable situation. In addition, *Candidia barbata* was more suitable for the fast flow than *Oreochromis niloticus niloticus*.

The experiment measured the critical swimming speed of two fish species by Increased Velocity Tests. The critical swimming speeds of *Candidia barbata* were 0.39 m/s–0.74 m/s, and the critical swimming speeds of *Oreochromis niloticus niloticus* were 0.30 m/s–0.46 m/s. This result can be designing parameters of ecological engineering for field fish restoration.

Keywords: *Candidia barbata*, *Oreochromis niloticus niloticus*, Video monitor, Bi-camera, Tail-beat frequency, Critical swimming speed.

* 通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士，10617台北市大安區羅斯福路4段1號，shark0201@gmail.com

一、緒論

1.1 前言

進行水域生態系統之環境監測，或是評估其復育程度，魚類是常見的指標性物種(宋等，2004)。魚類生態調查方法可分為非目視法與目視法，前者包括手釣(hook-and-line)、魚籠(baited fish trap)、刺網(trammel net)與電魚(electrofishing)等；後者包括錄影(video device)、照相(camera, still photography)、水下遙控潛航器(Remote Operating Vehicle)等(邵等，1993)。

非目視法雖不像目視法受能見度之影響，且能直接獲取魚隻體長、體重等資訊，但是採集方法會對採樣對象與採樣點生態造成破壞，侵入性高。而目視法受能見度影響，通常只能紀錄出現魚種類與出現隻數，來進行豐富度之計算，而難以見到隱匿性魚類，容易低估實際魚數量；不過對魚類干擾小，可觀察其自然行為。

魚類行為方面，近代已有著廣泛的研究，尤其許多生態工程的營造期望增加魚種多樣性，或讓魚類通過不連續的渠道斷面，這些工程的背後，需要事先深入探討當地魚種游泳能力等參數，以此參數來設計施工。

1.2 影像監測方法

生態調查方面，利用兩台平行放置之錄影機，以彼此間的距離與左右鏡頭拍攝魚隻位置差別為比例，去估計錄影到的魚隻長度(Boland, 1983)。同年有學者也以相同概念更深入的去計算雙髻鯊(*Sphyrna lewini*)魚體長度與魚隻彼此間的距離，重複量測精度可小於5%(Klimley and Brown, 1983)。

近代將兩台攝影機一台架於水族箱之前，一台架於水族箱之上，以兩台2D影像建立3D座標，觀察金魚(*Cyprinus Auratus*)在水族箱內移動路徑，並計算金魚游速(Kato *et al.*, 1996)。另有將量測魚隻長度之方法寫成半自動模式FICASS (Fish Image Capturing and Sizing System)，使能更經濟與快速的紀錄與研究魚類行為、游速與體型分布(Petrell *et al.*, 1997)。以單鏡頭上，加裝一對已知間距之雷射裝置，利用雷射光不偏

折之特點，將雷射打在目標物上，再由顯示器上兩已知距離雷射點，估計魚體長，在光線充足下(目標物照度16700Lux)平均誤差小於1公分，且隨著目標物與鏡頭距離大於2.5公尺誤差增加(Yoshihara, 1997)。

現今更有以聲波攝影機DIDSON (Dual frequency IDentification SONar acoustic camera)進行魚類監測，能夠在濁度高或是陰暗環境下量測魚體大小與游速，觀察行為，唯不能直接辨認魚種，還須與其他監測方法合併使用，且價格昂貴(Mueller *et al.*, 2006)。

1.3 魚類游泳研究

魚類游泳行為可分為三大類：持續(sustained)、延長(prolonged)、與爆發(burst)。爆發游速為無氧(anaerobic)運動，每秒可達10個體長(Bainbridge, 1960)，但只能維持在極短的時間內，像是躲避掠食者、漁網或是追捕獵物時使用(Wootton, 1992)；而持續游速係一好氧運動，可在低游速下維持好幾個小時，甚至幾個月；延長游速介於持續與爆發游速之間，可持續20秒到200分鐘(Beamish, 1978)，臨界游速(critical swimming speed)即為延長游速。

臨界游速，是推估游泳表現能力最重要的一個生物物理學的量測(Plaut, 2001)。臨界游速與體長、季節、溫度、性別、污染物、光照、食物與有無訓練，週遭氣體組成都有關係(Hammer, 1995)，但是體長是影響游泳表現最重要的因子，彩虹鱒(*Salmo gairdneri*)在臨界游速與體長上有正相關，總體長增加1公分，臨界游速約增加3.5 cm/s，約等同於每秒0.5體長速度(Waiwood and Beamish, 1978)，絕對臨界游速(m/s)隨著體長增加而增加；相對臨界游速(體長每秒，Body Length/second, BL/s)隨著體長增加而減少。

游泳的方式，主要不是依靠身體的運動，就是靠魚鰭的活動，早在亞里斯多德的年代就有人開始研究，其中魚鰭在游泳中扮演方向舵、煞車器與推進器的角色(Barton, 2006)。決定魚類游泳有幾個變數最為重要：魚隻長度、魚尾擺動頻率與魚尾擺動頻率之振幅，知道這些變數

間的關係不只能了解魚類活動的機制，也能用來預測魚的最大游泳速度(Bainbridge, 1958)。不過有研究指出在不同速度下，魚尾擺動振幅成一定值，故流速只與體長和魚尾擺動頻率有關(Bainbridge, 1958; Hunter and Zweifel, 1971)。

1.4 研究目的

本研究的目的在以雙鏡頭觀測，佐以數學運算，運用在渠道監測，以提供一個簡單、便宜且可行之非破壞性監測技術，將對於河川與生態化復育之人工渠道等水域生態復育評估有所助益。

此外，台灣在設計供魚類使用之生態工程方面常直接取自國外的參數，導致施工後生態復育效果差。本研究並深入研究台灣特有種台灣馬口魚(*Candidia barbata*)與常見外來種尼羅口鯢魚(*Oreochromis niloticus niloticus*)游泳運動之機制，期望作為台灣本土未來農田圳路生態工程的參數依據。

二、理論與模式

2.1 福祿數(Froude number)

流體力學中常用之無因次參數(Dimensionless number)之一，為慣性力與重力之比值。1861年，William Froude為了以小尺寸模型預測出實體長船隻流場，而建立福祿數之公式(Street *et al.*, 1996)。

福祿數(Froude number)為慣性力與重力之比值：

$$Fr^2 = \frac{\text{Inertia force}}{\text{Gravity force}} = \frac{\rho V^2 L^2}{\rho g L^3} = \frac{V^2}{gL} \quad (1)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (2)$$

其中 ρ 為液體密度， V 為液體流速， L 為液體深度， g 為重力加速度。福祿數表現出重力是影響自由表面流的重要參數，常用在明渠流等受重力影響較大的流體。

若福祿數值大於1，代表慣性力大於重力，

稱為超臨界流(supercritical flow)；若福祿數值小於1，代表重力大於慣性力，稱為亞臨界流(subcritical flow)。

2.2 臨界游泳速度(Critical Swimming Speed, CSS)

1957年因加拿大政府要在鮭魚遷徙的Fraser River建水力發電大壩，而請J. R. Brett做魚類游泳與代謝能力的研究，期望找出解決的方案(Brett, 1979)。Brett讓魚在能增加流速的涵管中游泳，階段性的增加流速維持某個時間間格，重複直到魚疲勞(fatigue)貼網，紀錄經過的時間做以下計算：

$$U_{crit} = V_p + \left(\frac{t_f}{t_i}\right) \cdot V_i \quad (3)$$

其中，

U_{crit} ：臨界游泳速度(fatigue speed or critical swimming speed)

V_p ：魚疲累發生時之前一個完整階段流速(penultimate velocity)

t_f ：流速調為 V_p 下一階段流速後，到魚疲累發生所花時間

t_i ：維持每個流速階段的時間間格(time interval)

V_i ：每階段流速增加量(velocity increment)

2.3 量測魚隻長度

2.3.1 魚隻與雙鏡頭在同一水平面

不論在室內或野外環境下，魚隻若是通過鏡頭攝影範圍，與鏡頭在同一水平面情況下游過，計算較為單純，其計算方法如下。

以雙鏡頭量測攝影範圍內魚隻的長度，如圖1至圖2表示：

其中，

$$e = c - \frac{a}{2} \quad (4)$$

$$f = d - \frac{b}{2} \quad (5)$$

a 為左鏡頭水平照射角度； b 為右鏡頭水平照射角度； c 為左鏡頭與右鏡頭連線之夾角； d 為右鏡頭與左鏡頭連線之夾角。

攝影完畢影片檔切割成每秒30畫格之影像

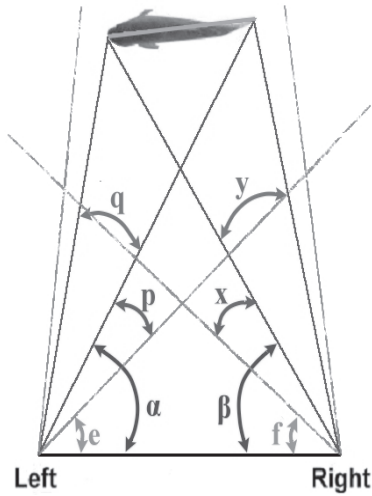


圖1 量測魚體長之角度俯視圖



圖2 雙鏡頭夾角俯視圖

檔後，利用同步程式使左右兩鏡頭攝影影像無時間差，量測與計算左鏡頭攝影畫面中魚尾巴末梢距離右邊畫面邊緣之角度為 p ，同理右鏡頭攝影畫面中魚吻部前端距離左邊畫面邊緣之角度為 x ，

$$\alpha = p + e \quad (6)$$

$$\beta = x + f \quad (7)$$

之後使用正弦(sin)公式，計算出 m 、 l 、 n 、 k 邊長，最後利用三角公式得出魚總體長 \bar{Z} (total body length)，見圖3。

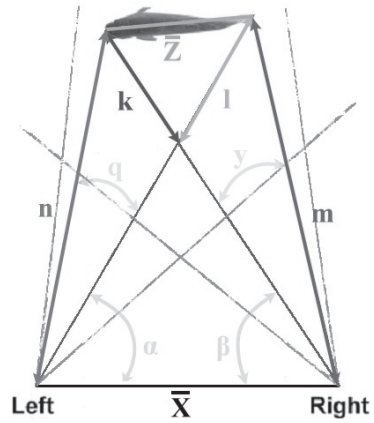


圖3 量測魚體長之線段俯視圖

$$m = \frac{\bar{X}}{\sin(180 - \alpha - \beta - y)} \cdot \sin(\alpha) \quad (8)$$

$$l = \frac{m}{\sin(\alpha + \beta)} \cdot \sin(y) \quad (9)$$

$$n = \frac{\bar{X}}{\sin(180 - \alpha - \beta - q)} \cdot \sin(\beta) \quad (10)$$

$$k = \frac{n}{\sin(\alpha + \beta)} \cdot \sin(q) \quad (11)$$

$$\bar{Z} = \sqrt{k^2 + l^2 - 2kl \cos(180 - \alpha - \beta)} \quad (12)$$

如果魚隻吻部靠近的是右鏡頭，或是魚隻由左鏡頭游向右鏡頭時，仍然可以用此方法做計算，只是符號所代表的邊與角度正負略有不同，對求取魚隻總長度沒有妨礙。

2.3.2 魚隻與雙鏡頭不在同一水平面

當魚在覓食或是跳躍、上溯時，常與鏡頭不在同一水平面情況下游過，而與鏡頭間存在一角度。此計算較為複雜，需要建立魚隻吻部與尾部之XYZ座標，再由下式得出座標間距離，即為魚隻長度：

$$\bar{Z} = \sqrt{(X_m - X_t)^2 + (Y_m - Y_t)^2 + (Z_m - Z_t)^2} \quad (13)$$

其中吻部座標為 (X_m, Y_m, Z_m) ，尾部座標為 (X_t, Y_t, Z_t) 。

2.4 建立魚隻三維座標

由於魚吻部較易觀察，故以雙鏡頭建立魚吻部之XYZ座標，若是要建立尾部座標則同理計

三、材料與方法

3.1 實驗場地

實驗場地為台灣大學水工試驗所中，總長約16公尺30公分、高70公分、寬40公分之渠道。水源來自渠道後方大型水槽內儲自來水，經由馬達抽送至渠道前端再由渠道順流而下。馬達可調節不同頻率強度以改變流量，渠道末端有一尾水板可也控制水深近而改變流速。實驗段位於尾水板前方1.65公尺處。

實驗魚種為台灣馬口魚與尼羅口孵魚。由於台灣馬口魚取得較困難，故在實驗室設一水缸存養，每週餵食3至5天，每天1到2次；但在實驗前兩天為使回復至自然棲地環境狀態，不予餵食；尼羅口孵魚取得方便，實驗前一天捕獲取得，存放一晚不予餵食，至實驗結束後即放回。

為使實驗魚隻固定在鏡頭可視範圍內，實驗段前方有一20公分長吸管整流器，後方設一鐵絲網以限制魚隻游泳範圍在長61公分內；並於渠道中放置隔板縮減渠寬成14.6公分，以方便拍攝魚尾巴之擺動。

實驗儀器與鏡頭皆擺設至渠道外，不會干擾到渠道內流場，也方便調整角度與間距，使拍攝範圍盡可能涵蓋魚隻活動範圍；並架設50瓦防水鹵素燈於實驗段上方與後方來補光，有助於達到高速攝影亮度需求。流速計與魚隻在水槽內相同高度擺放，以獲得實際魚隻承受之流速，並持續10秒數值不變方可記錄。

實驗時間依照不同魚種與不同長度之游泳能力有所不同。一開始將魚放置在0.1 m/s的流速當中，每次增加0.05 m/s，每段時間15分鐘使實驗魚調節與適應；重複每段時間與增加流速直到魚無法承受之最高流速，而貼在後方鐵絲網上，記錄流速與經過時間。貼網之後升高尾水板以降低流速至魚可以恢復自然游泳之情況，再把尾水板慢慢降低、增加流速至再次貼網。重複動作使總共貼網3次並記錄流速與時間，確定此實驗魚隻無法承受之臨界游泳速度(Critical Swimming Speed, CSS)。

實驗結束後測量魚隻體長(body length)與體重(body weight)。

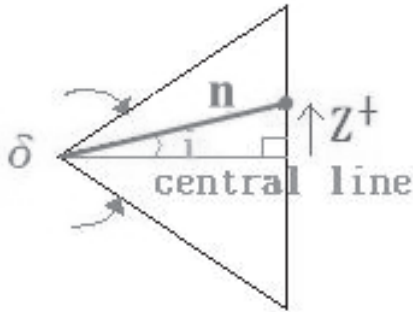


圖4 側視圖

算。首先從已切割完成之影像(image)分割中央線(central line)以利計算與建立相對位置，量測魚吻部距離中央線之垂直距離，計算角度 i ，位於中央線上方 i 為正值；位於中央線下方 i 為負值，如圖4。

其中 δ 為左鏡頭垂直照射角度。利用公式(10)之邊長 n 來計算 Z ：

$$Z = n \cdot \sin(i) \quad (14)$$

如圖5進行簡單的畢氏定理，即可求出 Y 與 X 。其中 Y' 為魚吻部與雙鏡頭間距線之垂直距離。

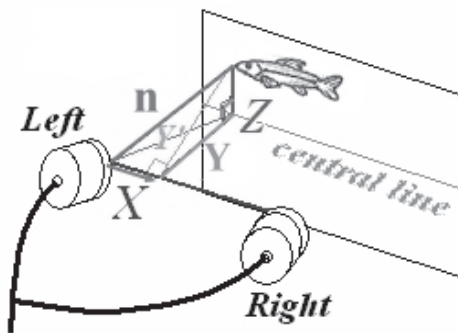


圖5 XYZ座標側視圖

$$Y' = n \cdot \sin(\alpha) \quad (15)$$

$$Y = \sqrt{Y'^2 - Z^2} \quad (16)$$

$$X = \sqrt{n^2 - Y'^2} \quad (17)$$

以上建立出之XYZ座標是以左邊鏡頭為原點(0, 0, 0)，計算出攝影範圍內魚隻吻部之相對位置座標，以便計算魚隻流速。

3.2 影像監測方法

將拍攝後DV帶中原始影像，經由個人電腦USB輸入源轉檔成為320X240大小，每秒30個畫格(30fps)之MPEG檔案，再剪輯成不同魚隻、不同流速之AVI檔案，最後經由程式把影片(video)切割成每秒30張之圖片(image)；影像壓縮格式採用「Xvid MPEG-4 Codec」。

左右兩台攝影機(Sony TRV-60、Sony GV-D1000)拍攝的影片檔，經由同步程式，使兩邊影片時間一致；在顯示器上左右影像皆貼兩條垂直直標尺幫助判斷魚隻位置，選擇輪廓清楚的魚隻，記錄其左右吻部水平與垂直位置、尾部水平位置，建立其XYZ座標系統，計算流速。

魚尾擺動頻率之高速攝影，則在渠道上架設相機(Casio, EX-F1)垂直向下以30-60fps的速度拍攝。拍攝完之影片採用Xvid MPEG-4 Codec格式壓縮，轉成AVI檔案，再切成圖片檔。每個流速挑選魚穩定之連續128張圖片，使用AutoCAD 2005，拉出魚尾擺動角度，逆時針為負值，順時針為正值，再利用傅立葉轉換成擺動頻率。

四、結果與討論

4.1 魚隻長度計算誤差

以雙鏡頭法計算不同流速下人工渠道中魚隻體長，與實際長度作誤差比較(表1)。

表1 台灣馬口魚與尼羅口孵魚以雙鏡頭法之誤差

魚種	總體長 (cm)	長度誤差 (%)	長度誤差 (cm)
台灣馬口魚	14.0	4.69 (±1.49)	0.66 (±0.21)
	11.2	4.59 (±3.33)	0.51 (±0.37)
	8.5	5.82 (±3.05)	0.49 (±0.26)
	7.0	4.89 (±3.09)	0.36 (±0.24)
尼羅口孵魚	14.0	6.62 (±3.33)	0.93 (±0.47)
	13.0	9.47 (±5.93)	1.23 (±0.77)
	6.4	9.11 (±3.71)	0.58 (±0.24)
	6.0	4.19 (±3.74)	0.18 (±0.16)

由圖6~7顯示出，台灣馬口魚誤差多偏向正值，且流速越高，正誤差越高；尼羅口孵魚則誤差多偏向負值，流速越高，負誤差越高。這是因

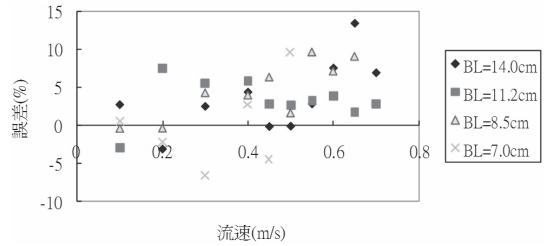


圖6 台灣馬口魚以雙鏡頭法之誤差(%)與流速對應圖

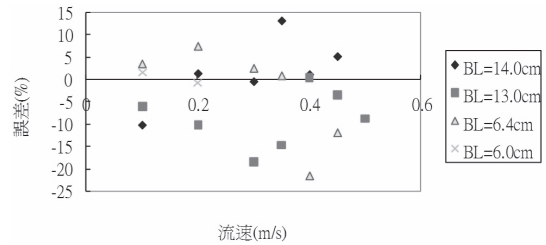


圖7 尼羅口孵魚以雙鏡頭法之誤差(%)與流速對應圖

為台灣馬口魚所能承受的流速高於尼羅口孵魚，而儀器調整流速大於0.5，馬達抽取到的水越混濁，而台灣馬口魚尾巴顏色較淺，人工判讀容易高估導致誤差多為正值；尼羅口孵魚則是流速越快越喜愛躲在紗網前方，讓紗網幫助魚體抵銷水流之衝擊，而常有魚尾巴彎曲情況發生，判讀上易低估魚體長度，導致誤差多為負值。

總的來說，誤差來源除了濁度與亮度影響人工辨識讀值外，魚體是否彎曲、魚尾巴是否彎曲、與魚身投影線是否與雙鏡頭平行(魚是否面向鏡頭)都會影響人工判讀的結果。

4.2 雙鏡頭法之魚隻流速與不穩定福祿數

魚隻流速也是判斷其健康與否的一項依據，不健康的魚游泳速度較健康的同種與同大小的魚來的慢。

經由雙鏡頭法量測魚隻於渠道控制範圍內間隔5秒鐘之座標變化，繪製出其不同時間下之流速(表2, 3)。

魚隻剛放入渠道時容易適應不良而有快速游動與欲跳出水面等不穩定的狀態故部分魚隻在低流速時有較快的游泳速度，持續增加流速魚隻開始適應，穩定度升高，在到達某一流速又會讓實驗魚隻穩定度下降、流速增加想逃離控制範圍，接著魚隻向後企圖藉由後方網子給予支撐，

表2 不同流速對應各總體長之台灣馬口魚之平均游泳速度與標準差

流速(m/s)	平均游速(cm/s)			
	14.0公分	11.2公分	8.5公分	7.0公分
0.10	0.14 (±0.08)	0.33 (±0.27)	0.26 (±0.17)	1.65 (±1.10)
0.20	0.11 (±0.07)	2.75 (±2.63)	1.13 (±1.32)	1.79 (±1.27)
0.30	0.10 (±0.04)	0.42 (±0.52)	2.90 (±4.16)	1.37 (±0.97)
0.40	0.32 (±0.27)	0.36 (±0.44)	0.37 (±0.30)	0.17 (±0.11)
0.45	0.16 (±0.11)	0.51 (±0.78)	0.92 (±1.04)	0.54 (±0.94)
0.50	0.14 (±0.07)	0.35 (±0.34)	0.93 (±0.82)	0.12 (±0.10)
0.55	0.47 (±0.33)	1.46 (±1.08)	0.12 (±0.04)	
0.60	0.84 (±0.53)	0.53 (±0.99)	0.22 (±0.12)	
0.65	0.18 (±0.11)	2.01 (±2.08)	0.14 (±0.09)	
0.70	0.21 (±0.15)	1.99 (±3.81)		

表3 不同流速對應各總體長之尼羅口鱒魚之平均游泳速度與標準差

流速(m/s)	平均游速(cm/s)			
	14.0公分	13.0公分	6.4公分	6.0公分
0.10	0.15 (±0.10)	1.21 (±0.84)	0.62 (±0.89)	0.09 (±0.10)
0.20	0.37 (±0.34)	1.20 (±1.09)	0.14 (±0.09)	0.76 (±0.97)
0.30	0.48 (±0.45)	0.19 (±0.14)	0.16 (±0.08)	
0.35	0.06 (±0.04)	0.83 (±1.10)	0.12 (±0.07)	
0.40	0.14 (±0.07)	0.20 (±0.13)	0.93 (±0.64)	
0.45	0.13 (±0.09)	0.80 (±0.56)	0.60 (±0.42)	
0.50		1.00 (±0.72)		

此時穩定度上升，魚隻尾巴靠著網子幾乎不動，直到流速增加到無法承受而整個身體貼網為止，此時魚隻游泳速度為零。

在高流速實驗中，台灣馬口魚與尼羅口鱒魚都產生小幅度的前後游動，導致標準差增加，又以尼羅口鱒魚最為明顯。假設魚隻在高流速的不穩定狀況下，已無法維持其覓食等行為，而需要全力對抗高流速。當魚種非上溯迴游習性之魚種，此時之流速(或是福祿數)若在野外自然無遮蔽環境下，相信是這種魚種不會進入的環境，故選取高流速下標準差最大之流速與福祿數將兩種魚類做比較(圖8)。

調查指出深潭(pool)棲地的福祿數不超過0.18；急流(riffle)的福祿數超過0.41；而深流(run)棲地環境介於兩者之間(Jowett, 1993)。實驗出尼羅口鱒魚最大不穩定之福祿數介於深潭(稚魚, juvenile)與深流(成魚, adult)之間，而台灣馬口魚則是介於深流(稚魚)與急流(成魚)之間。瞭解其資訊有助於未來要營造台灣馬口魚適合之棲地；或是要去除外來種尼羅口鱒魚的入侵，所要考量的棲地水力條件。

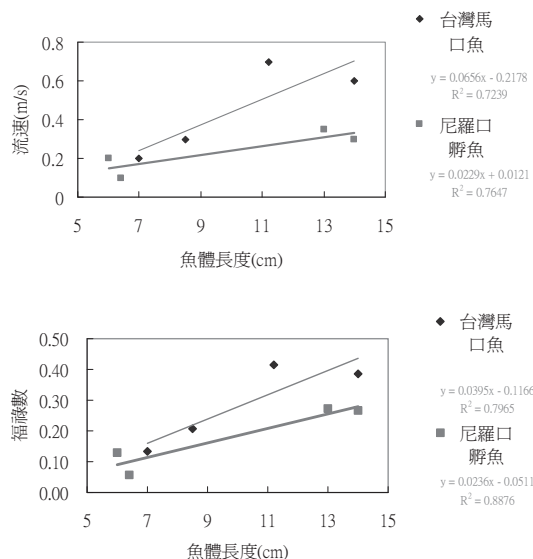


圖8 雙鏡頭法量測台灣馬口魚與尼羅口鱒魚之不穩定最高流速與福祿數

4.3 魚尾擺動頻率與不穩定福祿數

由渠道上往下拍攝不同流速下，魚尾擺動之頻率，以增加對台灣馬口魚與尼羅口鱒魚對抗

表4 台灣馬口魚在不同流速下之魚尾擺動頻率與擺動角度

魚體總長(cm)	流速(m/s)	福祿數	魚尾擺動頻率(1/sec)	平均擺動角度(°)
7.0	0.10	0.06	5.63	33.24 (±17.32)
7.0	0.20	0.15	6.56	32.55 (±7.85)
7.0	0.30	0.22	7.50	37.47 (±9.08)
7.0	0.40	0.33	9.84	33.58 (±9.73)
8.5	0.10	0.06	4.69	40.38 (±7.52)
8.5	0.20	0.13	5.63	38.34 (±7.28)
8.5	0.40	0.33	6.09	40.64 (±5.35)
8.5	0.50	0.34	7.03	34.23 (±7.19)
8.5	0.65	0.44	8.44	30.30 (±9.63)
14.0	0.10	0.07	5.63	32.30 (±6.72)
14.0	0.15	0.09	4.69	33.45 (±5.21)
14.0	0.30	0.21	5.16	33.58 (±4.01)
14.0	0.50	0.32	6.33	37.39 (±5.43)
14.0	0.65	0.42	5.86	33.29 (±11.05)
16.7	0.15	0.08	3.75	31.06 (±5.91)
16.7	0.26	0.17	4.69	31.48 (±5.18)
16.7	0.35	0.27	4.94	33.67 (±7.00)
16.7	0.53	0.37	5.63	35.04 (±11.21)
16.7	0.84	0.56	6.09	37.61 (±9.73)

各體長之間，魚尾擺動角度皆無顯著差異($P > 0.05$)。

表5 尼羅口鱒魚在不同流速下之魚尾擺動頻率與擺動角度

魚總體長(cm)	流速(m/s)	福祿數	魚尾擺動頻率(1/sec)	平均擺動角度(°)
8.1	0.30	0.21	6.56	39.84 (±6.19) ^a
8.1	0.33	0.24	9.38	36.45 (±4.52) ^a
8.3	0.10	0.07	3.75	19.39 (±5.86) ^{ab}
8.3	0.20	0.16	5.16	32.61 (±7.30) ^{ab}
8.3	0.30	0.21	6.56	31.83 (±7.82) ^{ab}
9.4	0.10	0.06	4.69	24.87 (±5.36) ^b
9.4	0.20	0.16	5.16	30.55 (±4.66) ^b
9.4	0.30	0.21	6.09	28.56 (±13.03) ^b
9.4	0.35	0.26	7.50	22.03 (±10.98) ^b
12.8	0.20	0.16	4.22	28.51 (±19.41) ^b
12.8	0.30	0.21	5.16	32.68 (±4.57) ^b
12.8	0.35	0.26	5.16	29.05 (±8.54) ^b
12.8	0.40	0.32	6.56	31.21 (±13.59) ^b
13.8	0.10	0.07	2.81	20.39 (±10.00) ^{ab}
13.8	0.20	0.16	3.75	32.16 (±3.07) ^{ab}
13.8	0.35	0.26	4.22	34.46 (±3.88) ^{ab}
13.8	0.40	0.32	4.22	36.66 (±6.96) ^{ab}

a.b：魚體長8.1與9.35公分、8.1與12.8公分擺動角度有顯著差異($P < 0.05$)，其餘沒有。

不同流速之反應，有更直接且不易受外在因素干擾之了解(表4、5)。

在低流速下，魚類除了利用尾巴擺動來增加游速，主要是靠胸鰭與背鰭來控制方向與減緩游速；在高流速下，為了有最低的阻力，胸鰭與背鰭會平貼在身上，主要靠著尾鰭快速的擺動來

維持平衡，故尾鰭是探討魚類游泳一個重要的關鍵所在。同樣福祿數下，小魚比大魚更需要高頻率的魚尾擺動讓其能維持在同一位置不被沖走(圖9、10)。

圖11中顯示，若以每秒水流多少總體長為相對流速，在相對流速為2.87 (BL/s)之前，同樣

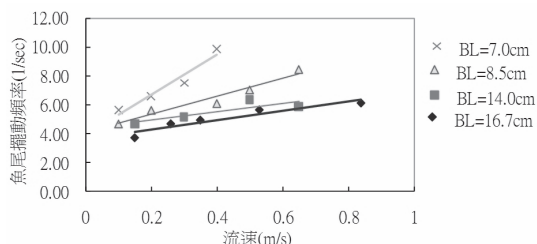


圖9 不同體長之台灣馬口魚在不同流速下魚尾擺動頻率

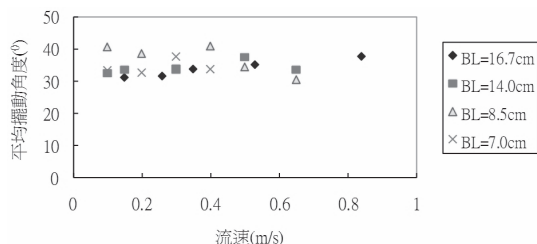


圖12 台灣馬口魚在流速下之魚尾擺動角度變化

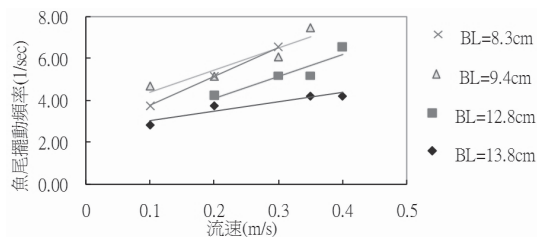


圖10 不同體長之尼羅口孵魚在不同流速下魚尾擺動頻率

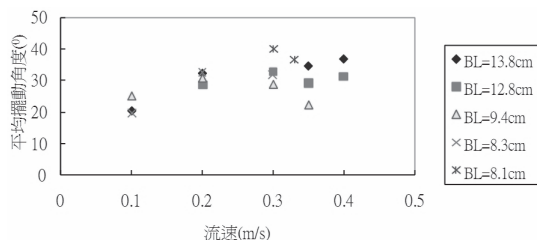


圖13 尼羅口孵魚在流速下之魚尾擺動角度變化

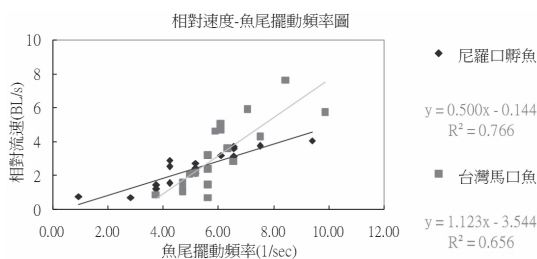


圖11 台灣馬口魚與尼羅口孵魚在不同魚尾擺動頻率下之相對流速迴歸圖

相對流速下，台灣馬口魚比尼羅口孵魚擺動頻率要高；在相對流速為2.87 (BL/s)之後，同樣相對流速下，台灣馬口魚比尼羅口孵魚擺動頻率要低。這表示在低流速環境下，尼羅口孵魚比台灣馬口魚能夠更有效率的適應環境；但是在高流速下，台灣馬口魚就比尼羅口孵魚魚尾擺動效率為高。這也顯示出，尼羅口孵魚適應較低的流速環境，而台灣馬口魚適合較高的流速環境。

而大小魚之間擺動角度除了尼羅口孵魚魚體長8.1公分與9.4公分、8.1公分與12.8公分擺動角度有顯著差異，其餘沒有(圖12、13)。結果顯示魚尾擺動幅度對於對抗不同流速並沒有明顯差異，推測在高流速穩定自身，主要依靠魚尾擺動頻率，擺動幅度影響不顯著，與前人研究結果相

符。

當流速增加到一個臨界流速時，魚尾擺動的幅度會有較大的變化，標準差最高，尤其是以尼羅口孵魚最為明顯，其魚尾擺動振幅呈現出類似心臟跳動的圖形，如圖14。

圖14中，尼羅口孵魚原本擺動頻率規律，到了流速增加為0.3 m/s後，尼羅口孵魚呈現前後小幅度移動之游泳狀態：先快速擺尾向前，再順水流向後，如此反覆，導致魚尾擺動頻率呈現快-慢-快-慢，再增加流速至0.35 m/s情況更加明顯，向前擺動尾巴頻率更快。台灣馬口魚比較看不出流速加快對魚尾擺動之影響，在圖15中流速到達0.4 m/s僅能看出擺動角度有大-小-大-小之波型，導致擺動幅度之標準差增加。

一樣選取擺動標準差最高的流速與福祿數，為假設其無法正常行為之流速(扣除剛放入渠道不適應產生的標準差大的流速)。

圖16顯示，用魚尾擺動變異來推估，比用雙鏡頭法量測魚游速不穩定做出來的值為高，台灣馬口魚之不穩定最高福祿數已趨近於學者所定義之急流之0.41值；尼羅口孵魚不穩定最高福祿數偏向於深流環境。

4.4 魚隻臨界游泳速度(CSS)

臨界游泳速度(CSS, critical swimming

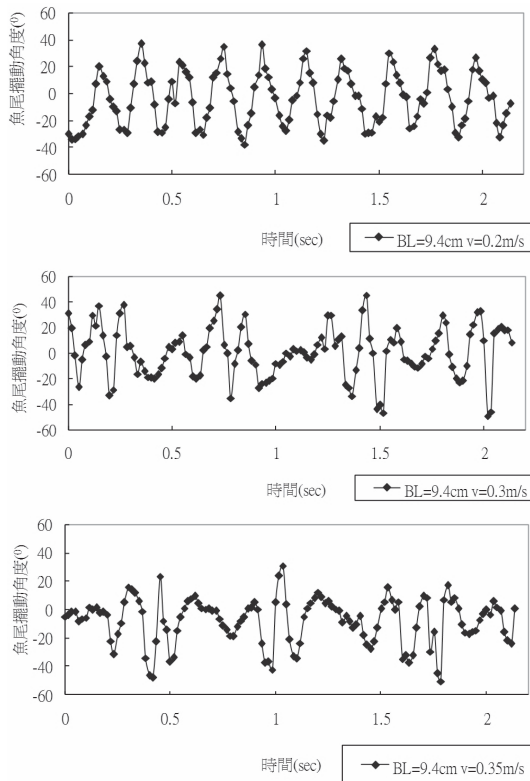


圖14 尼羅口孵魚在不同流速下之魚尾擺動圖

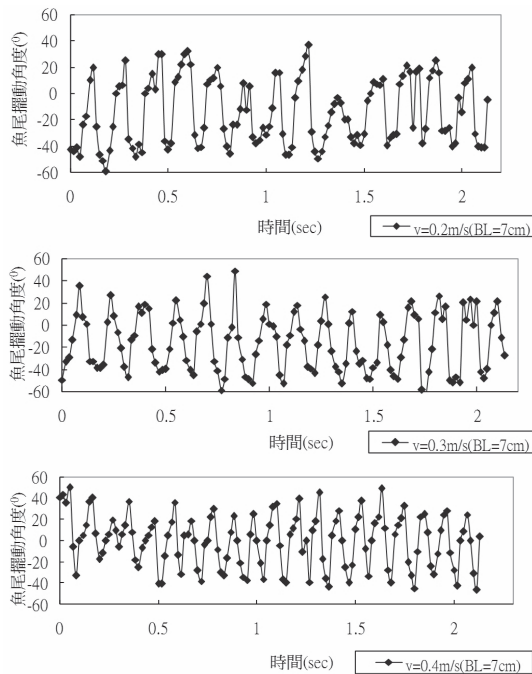


圖15 台灣馬口魚在不同流速下之魚尾擺動圖

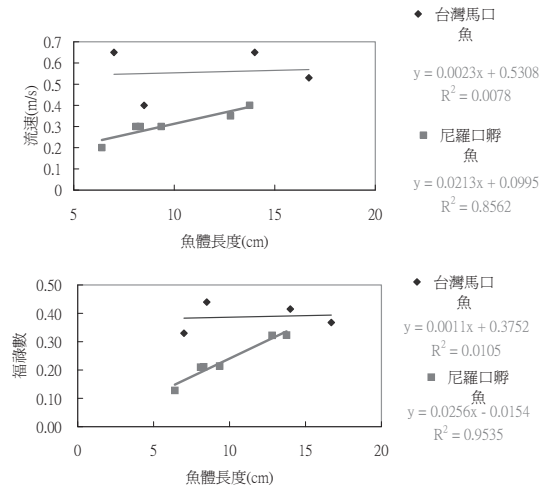


圖16 以魚尾擺動頻率推估台灣馬口魚與尼羅口孵魚之不穩定最高流速與福祿數

speed)是一種延長游速(prolonged swimming)，它可以持續2至200分鐘，故是建立魚梯生態工程一個重要的參數。本研究以不同體長之台灣馬口魚6隻，尼羅口孵魚9隻於渠道內以增加流速法(Increased Velocity Tests)量測兩種魚的臨界游泳速度與體長的關係。

在同樣體長之下，台灣馬口魚比尼羅口孵魚的臨界游速值高。台灣馬口魚7.0公分以上的成魚其臨界游速對應的臨界福祿數皆超過學者定義的急流(riffle)值0.41，而尼羅口孵魚不論體型大小，其臨界游速對應的臨界福祿數皆介於0.18至0.41之間的深流區(run)，比以魚尾擺動頻率推估其不穩定最大福祿數之值更高(表6)。

若臨界游速以單位時間內體長(BL/s)來做計算，小魚表現的比同種大魚來的更好，以7公分的台灣馬口魚為例，每秒可以游7.10個體長(7.10 BL/s)，而14.7公分的大魚，每秒僅能游5.03個體長(5.03 BL/s)；尼羅口孵魚游泳能力比台灣馬口魚弱，6.4公分的小魚每秒游6.61個體長(6.61 BL/s)，勝過14公分的大魚，每秒僅能游2.83個體長(2.83 BL/s)，但是若CSS以公尺每秒來看，小魚的絕對臨界游速還是比大魚來的低。

由於計算臨界游速在本實驗中需要讓魚貼網3次，尼羅口孵魚在第二、三次的貼網流速低於第一次貼網之流速較多，故其標準差較台灣馬口魚為大，但t-test檢定並不顯著。

表6 台灣馬口魚與尼羅口孵魚之臨界游泳速度(CSS)

	魚總體長BL (cm)	臨界流速 (m/s)	標準差	臨界流速 (BL/s)	臨界福祿數	水溫 (°C)	水深 (cm)
台灣馬口魚	5.3	0.39	0.03	7.36	0.28	18.70	19.90
	7.0	0.50	0.02	7.10	0.34	19.10	22.13
	7.0	0.49	0.02	6.97	0.39	22.40	15.60
	8.5	0.62	0.05	7.30	0.42	23.50	22.30
	11.2	0.72	0.02	6.44	0.45	19.50	26.50
	14.7	0.74	0.02	5.03	0.46	21.20	26.84
尼羅口孵魚	6.0	0.33	0.06	5.50	0.25	17.90	18.07
	6.4	0.42	0.04	6.61	0.34	18.60	16.03
	8.1	0.35	0.02	4.27	0.27	23.90	17.08
	8.3	0.30	0.03	3.67	0.22	20.40	19.83
	9.4	0.34	0.04	3.60	0.25	20.80	18.53
	12.8	0.41	0.04	3.22	0.28	21.10	21.87
	13.0	0.44	0.09	3.37	0.32	19.50	18.73
	13.8	0.46	0.01	3.31	0.33	21.20	19.50
	14.0	0.40	0.06	2.83	0.26	20.00	23.33

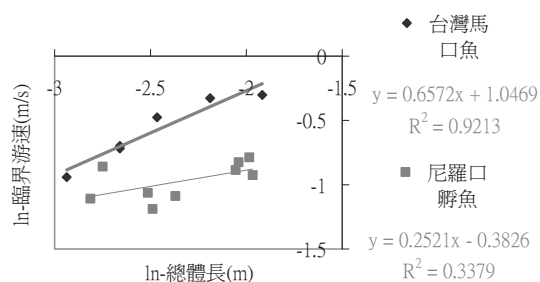


圖17 台灣馬口魚與尼羅口孵魚之體長與臨界流速(m/s)關係圖(台灣馬口魚水溫為18.7-23.5°C；尼羅口孵魚為17.9-23.9°C)

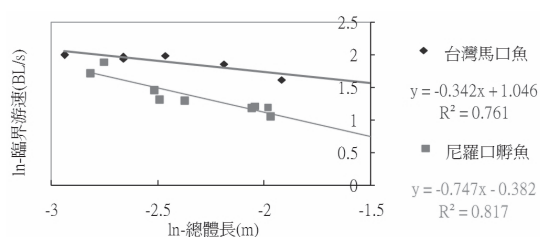


圖18 台灣馬口魚與尼羅口孵魚之體長與相對臨界流速(BL/s)關係圖(台灣馬口魚水溫為18.7-23.5°C；尼羅口孵魚為17.9-23.9°C)

臨界流速通常是拿來設計渠道內魚類適合最高流速之重要參數，也被應用至魚梯等生態營造工程。

由於只考慮臨界流速作為設計參數容易忽略水深，常常設計了一個流速很快的渠道，結果

因為水深太淺大魚無法進入，對小魚來說流速又太快也無法存活的窘境，故本研究認為應該同時考量水深因子，以臨界福祿數作為設計依據。或者採用砌石工法，增加流速的多樣性，同時營建緩流區與急流區，稚魚有棲息躲避之空間，也可以吸引適合不同流速之生物前來。

五、結論與建議

本研究結論與建議如下：

1. 以雙鏡頭法量測魚體長度之平均誤差百分比最高為9.47% (1.23公分)；最低為4.19% (0.18公分)。誤差來源除了濁度與亮度影響人工辨識讀值外，魚體是否彎曲、魚尾巴是否彎曲、與魚身投影線是否與雙鏡頭平行(魚是否面向鏡頭)都會影響人工判讀的結果。
2. 以雙鏡頭方法量測魚隻流速，得出尼羅口孵魚最大不穩定之福祿數介於深潭(稚魚)與深流(成魚)之間，而台灣馬口魚則是介於深流(稚魚)與急流(成魚)之間。
3. 在相同流速下，魚隻長度越小，魚尾擺動頻率越快。相對流速(BL/s)與魚尾擺動頻率成正比，在低流速下，尼羅口孵魚擺動效率較高，在高流速下，台灣馬口魚擺動效率較高。
4. 以魚尾擺動頻率之不穩定度來推測，台灣馬口魚之不穩定最高福祿數已趨近於學者所定義之

急流(riffle)之0.41值；尼羅口鱒魚不穩定最高福祿數偏向於深流(run)環境。

5. 台灣馬口魚之臨界流速介於0.39 m/s (BL = 5.3 cm)至0.74 m/s (BL = 14.7 cm)之間；尼羅口鱒魚之臨界流速介於0.30 m/s (BL = 8.3 cm)至0.46 m/s (BL = 13.8 cm)之間。

本研究設計出雙鏡頭法，能量測魚隻長度與其XYZ座標，估計魚隻流速，且量測誤差最高不到9.5%；對於不易捕獲或是保育類的魚種是一良好之非侵入式生態監測技術。惟以人工判讀方法非常耗時耗力，期望未來能結合電腦程式，做出即時監測系統，將能更有效且更精準的得到結果。

謝 誌

本研究感謝行政院農委會「農田水利會生態工程推動與調查(97農發-6.1-利-03)」與「農田水利會生態工程成效評估與技術推廣(98農發-4.1-利-03)」之經費支持，與苗栗農田水利會前工程師與設計股長涂乃仁先生的幫助。特別感謝友晉與研究室夥伴瑞君學姊、尹婉、奕良、巧雯研究上的協助。

參 考 文 獻

1. 宋蘭蘭、陸桂華、劉凌，2004。「淺析生態系統健康評價研究現狀」。河海大學學報(自然科學版)。第32卷，第五期。539-541頁。
2. 邵廣昭、何林泰、林介屏，1993。「魚類群聚生態調查監測與分析方法」。生物科學。第36卷，第二期。41-56頁。
3. Bainbridge, R., 1958. The speed of swimming of fish as related to size and to the frequency and amplitude of the tail beat. *Journal of Experimental Biology*. Vol. 35. pp.109-133.
4. Bainbridge, R., 1960. Speed and stamina in three fish, *Journal of Experimental Biology*. Vol. 37. pp.129-153.
5. Barton, M., 2006. *Bond's Biology of Fishes*. Thomson Reuters. New York, USA.
6. Beamish, F. W. H., 1978. *Fish Physiology*. Academic Press, Inc. New York, USA.
7. Boland, G. L., 1983. A technique for determining length of free swimming fishes using underwater stereo television. The visual assessment of fish population in the southeastern United States: 1982 workshop, Technical Report 1(SC-SG-TR-01-83). The South Carolina Sea Grant Consortium. pp. 10-11.
8. Brett, J. R., 1979. This Week's Citation Classic. No. 17. pp. 177.
9. Hammer, C., 1995. Fatigue and exercise test with fish. *Comparative Biochemistry and Physiology*. Vol. 112A. pp.1-20.
10. Hunter, J. R. and Zweifel, J. R., 1971. Swimming speed, tail beat frequency, tail beat amplitude, and size in Jack Mackerel, *Trachurus symmetricus*, and other fishes. *Fishery Bulletin*. Vol. 69(2). pp.253-266.
11. Jowett, I. G., 1993. A method for objectively identifying pool, run, and riffle habitats from physical measurements. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. Vol. 27. pp.241-248.
12. Klimley, A. P. and Brown, S. T., 1983. Stereophotography for the field biologist: measurement of lengths and three-dimensional positions of free-swimming sharks. *Marine Biology*. Vol. 74. pp.175-185.
13. Kato, S., Tamada, K., Shimada, Y. and Chujo, T., 1996. A quantification of goldfish behavior by an image processing system. *Behavioural Brain Research*. Vol. 80. pp.51-55.
14. Mueller, R. P., Brown, R. S., Hop, H., and Moulton, L., 2006. Video and acoustic camera techniques for studying fish under ice: a review and comparison. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. Vol. 16(2). pp. 213-226.
15. Petrell, R. J., Shi, X., Ward, R. K., Naiberg, A. and Savage, C. R., 1997. Determining fish size and swimming speed in cages and tanks using simple video techniques. *Aquacultural Engineering*. Vol. 16. pp. 63-84.
16. Plaut, I., 2001. Critical swimming speed: its ecological relevance. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*. Vol. 131. pp.41-51.
17. Street, R. L., Watters, G. Z. and Vennard, J. K., 1996. *Elementary Fluid Mechanics*, 7th ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.
18. Waiwood, K. G. and Beamish, F. W. H., 1978. Effects of copper, pH and hardness on the critical swimming performance of rainbow trout (*Salmo gairdneri* Richardson). *Water Research*. Vol. 12. pp. 611-619.
19. Wootton, R. J., 1992. *Fish Ecology*. Blackie and Son Ltd. New York, USA.
20. Yoshihara, K., 1997. Fish body length measuring method using an underwater video camera in combination with laser discharge equipment. *Fisheries Science (Japan)*. Vol. 63(5). pp. 676-680.

收稿日期：民國 99 年 01 月 11 日

修正日期：民國 99 年 06 月 15 日

接受日期：民國 99 年 06 月 25 日