

CCD 影像遙測波浪之研究

周宗仁¹ 尹彰¹ 黃偉柏²

1. 教授, 國立台灣海洋大學河海工程學系, 基隆市北寧路 2 號
2. 博士後研究, 國立台灣海洋大學河海工程學系, 基隆市北寧路 2 號
電子郵件: paulhw@ind.ntou.edu.tw

摘要

本研究是應用遙測技術, 以電耦合元件影像攝影機 (CCD, charged coupled device) 拍攝波場的變化, 同時配合波高計陣列的量測, 將兩種量測系統的量測數據, 以規則波實驗回歸出轉換函數, 計算波場的週期與波高。另外, 遙測不規則波時, 當波浪斜率小於 0.04 時, 遙測與實測結果開始產生較大的偏離。實驗總共進行兩個區域的量測, 以驗證轉換函數的通用性。

關鍵詞: 遙測技術、電耦合元件影像攝影機。

Sensing water surface fluctuations through CCD image sequences

Chun-Ren Chou¹ John Z. Yim¹ Wei-Po Huang²

Abstract

Experiments were carried out to assess the feasibility of measuring wave fields using a CCD camera system. Information concerning the wave fields can be extracted from the CCD images in forms of gray scales. By comparison with results measured by wave gauge arrays at the same location, the gray scales can then be related to the physical wave characteristics through a transfer function. The results obtained from regular wave experiments were then used for the cases with irregular waves. It is shown that, the results deviate from the "in situ" measurements for cases when the wave slopes are less than 0.04. Two regions of interests were used in the study to test the universality of the transfer function.

Keywords: charged coupled device, remote sensing.

一、前言

一般來說, 在量測波場特性時, 通常是在定點(in-situ)設置波高計或浮球測器

等儀器來進行觀測。這樣的量測結果皆極為準確。在波場符合均一性(homogeneous)及遍歷性(ergodic)的假設時,可以用這些測點的量測結果代表一個區域的波場特性。然而,如果在地形、地物變化較大的波場附近進行量測,因為該區波場特性已不符合前提假設,如果依舊以這樣的方式進行推演,則會產生較大的誤差。

遙測技術,是儀器以不接觸水面的方式,對波場的特性進行量測。由於遙測儀器可以簡便地搭載於航空器上或是於岸上裝設,並不需要限定在特定點上設置,所以並不會阻礙漁事工作和船隻航行,也不易受到暴風雨和海浪的侵襲而損害,在儀器的維護方面較為方便。此外,提供大範圍的資料擷取,也是其優點之一;其可以在一次的步驟內,同時量測一個區塊內波場的特性。經過計算後所得的波浪資料即具有『面』的意義,也就較具有代表性。而這樣的量測方式輕易地簡化了傳統量測方式在擷取大範圍波浪資訊時,需不斷移動測站位置的窘境。

遙測技術的發展,一般是透過各種雷達的偵測或是攝影的方式擷取所需的資料。然而,不管是雷達或是攝影,最終處理的是由波浪反射回量測儀器的訊號,利用底片或是類似的機制將傳回的訊號顯影。而圖像中所顯現的紋理(或色彩),則直接反應海面上的水面變化(王, 1998)。因此,遙測記錄影像裡每一點的色階代表該瞬時空間域裡波浪對訊號源的反應。隨著科技的進步,目前已經可以將錄製的影像,直接轉換成數位的訊號存入電腦,方便後續的處理分析,所以,遙測可以說是十分便捷的量測方法。

拍攝波場變化時,是將立體的三維水面變化(平面座標的橫軸、縱軸以及波浪高程)投射至平面的二維(平面座標的橫軸和縱軸)相片上,波高的資訊會因此而失去。然而,由於水面變化會造成光輝度(luminance)的變化,這些不同強度的光透過照相機鏡頭後,投射至底片曝光會產生不同色澤的陰影。而遙測則可以透過分析這些陰影來還原波高資訊,以達到觀測波場變化的目的。Stilwell 和 Pilon (1974)指出,水面變化所顯現光的輝度與波浪頻譜能量成正比。因此,可以藉由分析底片上的陰影強度,還原水面變化高程的變化。由上述可知,光源對影像遙測分析結果的影響相當大。

Keller 和 Gotwols (1983) 利用 CCD 攝影系統觀測實驗室裡水槽波場的變化。實驗的照明設備設置於拍攝範圍內的水底,採用一長列的螢光燈組排列於半透明的矽膠盤邊緣,形成發散均勻的燈源;攝影機採垂直向下的方式進行錄相。由於螢光燈源排成列狀,因此,畫面裡波浪顯現的輝度會隨著與燈源的距離增加而成指數形式下降。若未進行任何的調整修正,畫面裡光強度的統計分佈,並不會呈現常態分佈的形式。為了減少光源對計算結果的影響,該研究在攝影機鏡頭前加裝楔形的減光鏡片,使整張拍攝畫面受光的情形趨向於一致,結果發現在加裝減光鏡片後,畫面裡波浪顯現的

輝度分佈則接近於常態分佈。

Klinke (1996)除了在實驗室進行上述相同的實驗外，同時設計新的量測方式，分別在實驗室以及現場量測裡應用。在實驗室進行的實驗裡，以透明的薄片彎曲成不同曲度的正弦波，圍繞放置於拍攝範圍邊，藉由這些已知斜率的『人造波』來率定實際的波浪斜率。另外，燈源的部分則改採用 LED 燈組，均勻的排列於整個拍攝範圍內，使得整張畫面裡波浪顯現的輝度保持均一。在現場拍攝時，攝影機則架設於浮球的正上方，盤狀的燈源則沒入水中，同時觀察風波的成長、消散和海氣交互作用的機制。

Gotwols 和 Irani (1980)利用 CCD 攝影系統觀測現場波浪，並計算重力波的相位速度。攝影機架設於量測平台上，斜向拍攝水面。由於並未設置其它輔助燈源，水面輝度直接受到自然光照度的影響，所以量測時，需要同時以另外一部攝影機拍攝天空的照度以方便比對。由於拍攝過程是在一定的擷取速率下錄製畫面，所以可以計算波場在時間域裡的變化。

Lubard 等人 (1980)利用數位攝影機觀測現場波浪，發現水面反射光射至鏡頭的機制與兩個角度有較大的相關性，一是波浪斜率的法線與攝影機的夾角，二是波浪斜率的法線與水平面的夾角。如將這兩個角度加以考量時，則可以推導出波浪表面斜率與波高二維波數譜間的關係式。

Senet 等人 (2000)以 CCD 攝影機在實驗室平面水池裡遙測波場。照明設備採用投射燈向上投射至水面上大帆布後成為發散的光源。另外並提到，雖然拍攝影像範圍是方形的，但是實際攝入的波場範圍隨著與攝影機的距離增加而更為寬廣，若是沒有進行任何修正的話，在計算二維波數譜時，則會產生極大的誤差。

由前述研究可以得到下列結論，水面光輝度的強弱與燈源照度和波浪表面斜率有相當大的關連性。而上述 CCD 遙測波浪的實驗大多皆是以微小尺度進行，實驗的風波波長分佈範圍大約從 0.4 至 24 公分。然而，如果直接應用於工程尺度時，若使用相同的量測和計算方式，則會產生一些問題。另外，部分實驗並未於波場裡設置同步量測的儀器，因此所計算的波浪能量分佈並不是以有因次化的尺度表示，無法提供量化的結果。此外，斜向拍攝所造成的影像扭曲則會形成計算二維波數譜時的誤差。因此本研究在實驗和分析方法做了一些修正，包括加大拍攝的面積、於實驗水池裡設置波高計陣列，藉由比對直接量測和影像遙測的結果，以得到量化的數據。另外，並在時間域裡以測點的量測結果計算轉換函數，避免影像扭曲對空間域裡所計算的波數譜，產生影響。

二、實驗方法

拍攝波場水面變化後，需將由人眼睛可以識別的『影像』轉換成電腦可以判讀的訊號，方可進行計算。圖 1 是由連續規則波影像中所擷取的一張圖檔。波浪週期 0.8 秒、波高 3 公分。從圖裡可以發現水面變化的高程變化顯現出不同的灰階值，波峰處較亮(灰階值較大)，波谷處較暗(灰階值較小)。每一張畫面是由許多小格的像素(pixel)所組成(繆，2000)。而每一個像素所表現的色澤，在電腦的識別裡，以三原色的組合做為代表，也就是所謂的 RGB 值。本研究為了簡化色度的變化，拍攝時是以黑白片的形式進行，此時三原色的識別值皆為相同，其中黑色的 RGB 值為(0,0,0)，白色的 RGB 值則為(255,255,255)，所有的色差減為 256 種。色度的強弱則以『灰階值』(gray value)來辨別強弱。至於數位化的步驟，則是以讀取位元的方式將每一張圖檔裡像素的灰階值擷錄出來。

實驗期間選定拍攝範圍後，鏡頭則不再進行任何的更動。首先從影像裡找尋每根波高計測站對應於圖像裡的像素後，依照拍攝的時序，將每一張相片裡該像素的灰階變化值予以擷取記錄，成為遙測波場水面變化的灰階變化記錄。

另外，拍攝期間，由於各種訊號的干擾，會造成畫面出現雪花狀的雜訊；或是其它無法預知瞬間出現的光源，會使水體突然反光；因此拍攝的畫面需經過平滑手續，以減低這些雜訊對遙測影像的影響。本研究所使用的平滑步驟包含了空間域裡的九格像素加權平均法和時間域裡的五點平均法。

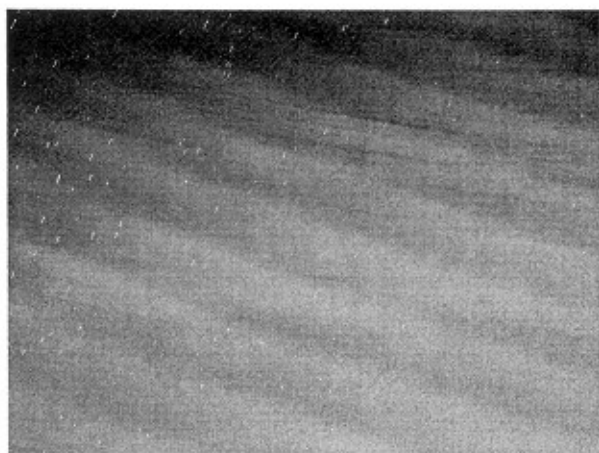


圖 1 規則波水面變化之影像

圖 2 是遙測影像裡相對測點的規則波原始灰階序列，其中波高為 4.3 公分，週期 1.0 秒。由圖裡可以發現，灰階序列在波峰與波谷處，出現了許多鋸尺狀的雜訊。這

個現象會在判別波峰和波谷於時間軸出現的位置時發生錯誤。另外，相鄰兩個時序的記錄也常會發現沒有任何變動的水平波形，這與實際的波浪水面變化並不相符。圖 3 為經過空間和時間域等平滑步驟處理的灰階序列，此時的波形已較為平滑，可以清楚的辨識出波峰與波谷的位置，也與實測的水面變化記錄結果較為接近。

灰階記錄經平滑處理後，將平均值扣除，成為平均值為零的灰階波動，再以零上切法切割，定義出灰階序列的振幅(G)和週期(T_{image})；這與波浪水面變化記錄中的波高(H)和週期($T_{wave\ gauge}$)是互相對應的參數。最後，再將所有測點遙測與直接量測的結果比較，並計算波高與灰階振幅間的轉換函數。

對本實驗設計來說，是以灰階序列和波高計量測的波浪週期做為起始限制(threshold)的參考；也就是說，所有的實驗佈置以及計算方式需在兩個系統所量測波浪週期的相對誤差小於 5% 以下，方可繼續進行。對於未平滑灰階序列所計算波浪週期的相對誤差隨著實驗條件的波浪週期愈大而增加，最大可達到 50%。在經過平化步驟後，所有量測波浪週期的相對誤差會降至 5% 以下。這是因為未平滑的灰階序列會有許多鋸尺狀的雜訊，另外，相鄰兩個時序的記錄也常會發現沒有任何變動的水平波形，如這些現象在零水位面線附近出現，則會造成切割波浪的誤差。因此決定使用平滑的步驟來處理數據。

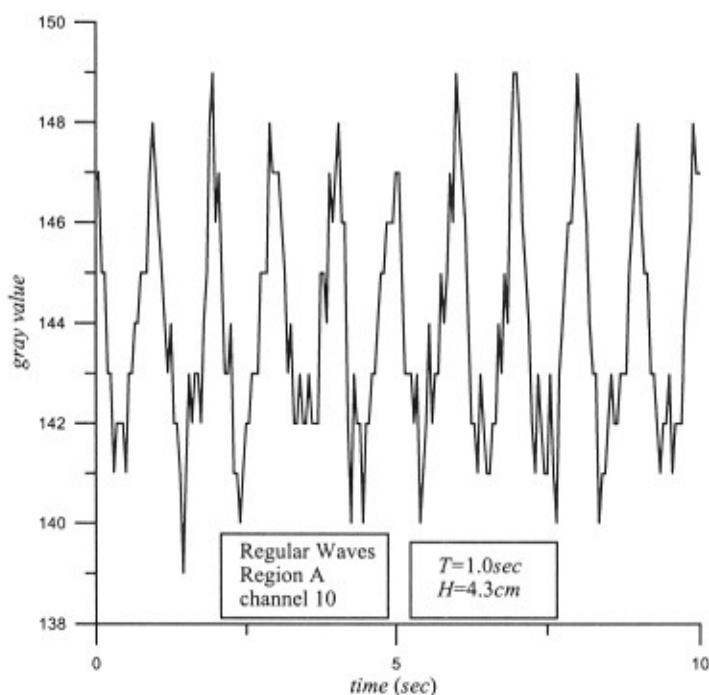


圖 2 遙測影像規則波的原始灰階序列

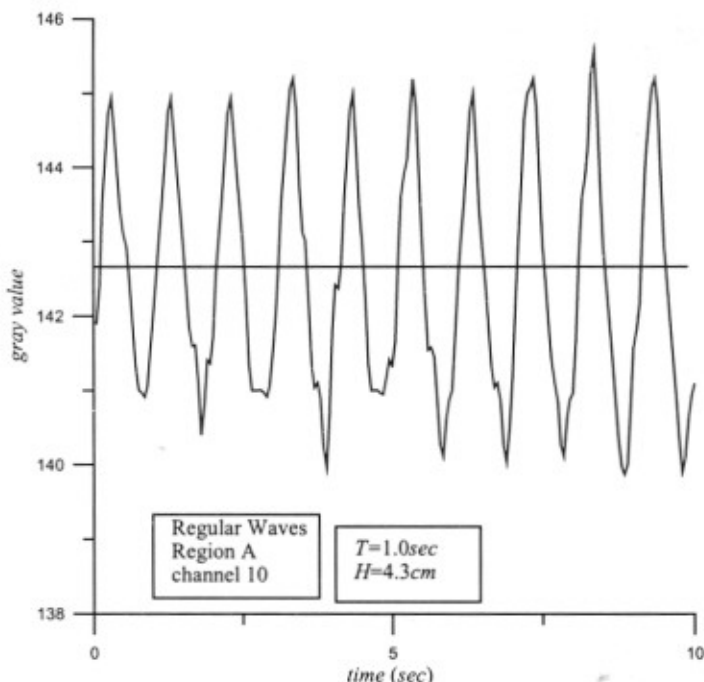


圖 3 遙測規則波影像經平滑處理後的灰階序列

三、設備與條件

本研究是在『海洋大學』、『海洋工程綜合實驗館』裡的平面水池裡進行。造波實驗共分為兩種，一是以規則波進行，利用系統性的實驗條件，分析影像灰階和實測水面變化序列間的定性關係，並以實驗結果回歸灰階振幅與實測波高之間的轉換函數。二是以 JONSWAP 頻譜為目標頻譜(式 1)，進行不規則波實驗，同時以規則波實驗所計算的轉換函數，推估波場的示性週期($T_{1/3}$)和示性波高($H_{1/3}$)並與實測值比較。其中實驗條件簡列於表 1。

$$s(f) = 0.081(2\pi)^{-4} g^2 f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right] \gamma^{\exp[-(f/f_p)^{-2}/2\sigma^2]} \quad (1)$$

f_p ：尖峰頻率(peak frequency)，波譜密度值最大時的頻率。

γ ：尖峰集中度係數(peak enhancement factor)， $\gamma = 1 \sim 7$ 。在實驗室造波時是用平均值 3.3。

σ ：代表控制頻譜寬度的參數

$$\begin{aligned} \sigma &= 0.07 : f \leq f_p \\ &= 0.09 : f > f_p \end{aligned} \quad (2)$$

表 1 實驗條件

	週期 (T) sec	波高 (H) cm	A 區	B 區
			同一週期實驗時所選用的波高條件	
規則波	0.6	2.64-5.71	6	5
	0.7	3.42-6.74	6	5
	0.8	3.30-6.74	6	5
	0.9	3.41-6.42	6	5
	1.0	3.10-6.25	6	5
	1.1	2.72-5.77	6	5
	1.2	3.01-6.38	6	5
	1.3	3.10-6.29	6	5
	不規則波	示性週期($T_{1/3}$)	示性波高($H_{1/3}$)	A 區
0.6		2.77-4.52	2	4
0.7		3.19-5.62	0	4
0.8		3.07-5.17	2	4
0.9		2.76-5.74	0	4
1.0		2.71-5.42	2	4
1.1		2.89-5.36	0	4

實驗佈置如圖 4，所使用到的設備簡述如下：

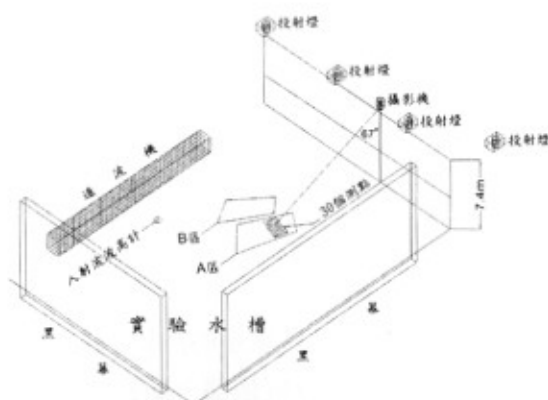


圖 4 實驗佈置圖

實驗水池：水池長、寬各 50 公尺，深 1 公尺。水池底部及側壁為鋼筋混凝土結構。實驗水深保持在等深 0.6 公尺的條件下進行。為減少二次反射對實驗的影響，在造波機的對面設置斜率為 1/6 砂石消波斜坡。

波高計：波高計使用全英公司製造之 50 公分長之容量式波高計擷取數據。本研究共使用 31 根波高計，包含一根量測入射波高，設置於距離造波板前 4.3 公尺，以及 30 根波高計排列成矩陣形式(6 列×5 行)。其中，列間距 0.4 公尺，行間距則為 0.8 公尺。

電耦荷元件影像攝影機 (CCD)：攝影機拍攝的光譜波長除了一般可見光外，還可感應到 750 nm 以上的紅外光。攝影機底端設有遠端控制系統，可於控制室內調整攝影機的焦距、光圈、拍攝範圍、攝影機俯角和左右轉動旋角度等，其設置於水平高程 7.4 公尺處，斜向拍攝觀測範圍，俯角分別為 67°(A 區)和 70°(B 區)。鏡頭前加裝一組偏光鏡片，利用光的橫波性原理與偏光鏡的光柵設計，阻擋偏射的光源(莊，1998)，也就是避免水面垂直向上的反光入鏡。另外，由於水面常會倒映四周的景物，形成水色不一的現象，例如倒映屋頂的樑和牆壁等顏色。而這樣的現象會在後續分析時，影響計算結果(Bracewell, 1995 和 Jähne, 1997)。為了避免這些現象發生，實驗水池上方、左側和後方均以大塊黑色帆布鋪蓋吊置，使得拍攝範圍內的水色能大致保持均一。

燈源：採用四盞 400W 投射燈，設置高程與攝影機同高。

波高計陣列量測時，波浪水面變化的取樣頻率為 20 Hz，規則波共取樣 1024 組，不規則波則取 2048 組，擷取時間長度分別為 51.2 秒和 102.4 秒。為了方便比對，影像也是從視訊檔裡以每秒 20 張畫格的擷取速率進行。實驗時，拍攝區域共分為 A、B 兩區，其中是以 A 區規則波的量測結果，回歸計算轉換函數，並用 B 區量測結果驗證轉換函數的適用性。

另外需注意的是，由於攝影機並不是以垂直向下的角度拍攝，而是以斜向的角度錄像，所以入鏡的範圍，會隨著與攝影機的距離增加而更寬廣。拍攝範圍 A 區以中心為基準點，短邊長為 338 公分，長邊長為 762 公分，畫面中像素換算為實際面積約等於 4.18 平方公分。B 區與 A 區形狀相似，其短邊和長邊分別為 310 公分和 575 公分，畫面中像素約等於實際面積的 3.45 平方公分。由於圖上所顯現的空間尺度並不是成定值，若是本研究依照前人的研究步驟，在空間域裡以二維波數譜進行解析，則需對代入的空間座標進行修正，否則會產生極大的誤差。然而，由於影像扭曲空間座標的修正步驟十分繁瑣，因此本研究摒棄在空間域裡的計算方式，採以選定相對於波高計所在的像素於時間域裡的灰階變化做為分析依據。由於畫面像素所佔的實際面積非常小，因此影像扭曲對本研究的影響則較不明顯。

四、驗結果與討論

4.1 非均一光源之修正

水面上顯現的輝度大小與該點接受光源的照度量有關。隨著測點與光源距離的增加，影像裡所顯現的灰階強度則漸漸減弱(Jähne 和 Riemer, 1990)。Keller 和 Gotwols (1983)提到畫面中灰階強度大約與光源距離成指數反比的型態。本研究光源設置於觀測範圍的一側，所以會造成水面所受到的照度呈現不均一的現象。圖 5 的橫軸代表測點的平均灰階值，縱軸代表其相對的灰階振幅。由結果發現，平均灰階值越大，其相對的灰階振幅卻越小。也就是說，在相同的規則波造波條件下，測點所接受的光源照度越強，所反應的灰階振幅卻越小。由於實驗時水池裡未鋪設任何地形以及結構物，所以理論上來說，拍攝範圍內的波高與週期應該是一致的；相對的，畫面裡所有測點的灰階振幅也應該呈現相同的趨勢。

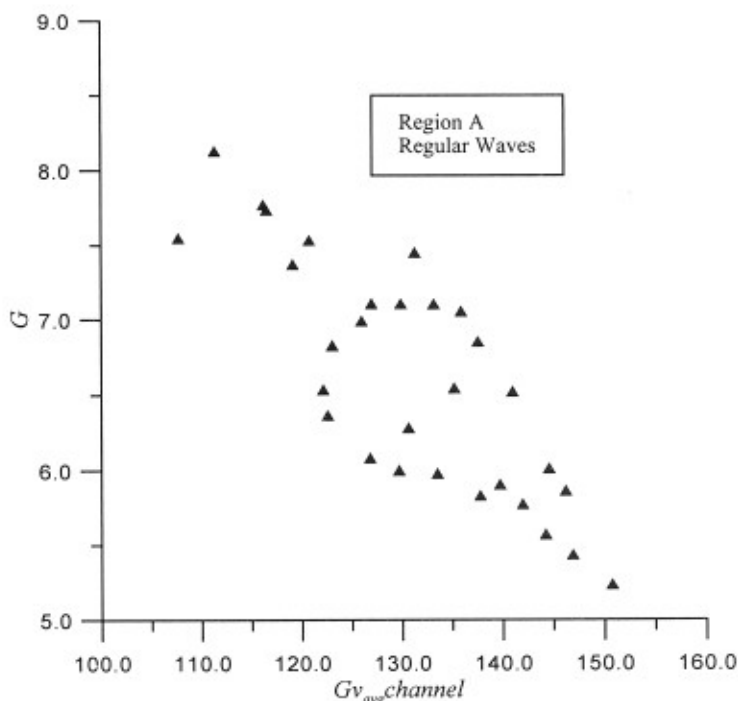


圖 5 灰階振幅與平均灰階值關係圖

本研究提出修正公式，修正各測點的振幅，計算方式是以整張畫面和各測點灰階平均值的比值代入計算。藉由這樣的修正，可以使非均一性光源對灰階振幅的影響減低，修正過後的灰階振幅與平均灰階值如圖 6，比較圖 5 和 6 可以發現，修正後灰階

振幅的分佈漸趨於定值。也就是說，灰階振幅在經過修正後，不會因為觀測範圍受光不均勻呈現不一的現象，而是與波場裡的波動振幅一樣，呈現一致的形態。修正公式表為：

$$G_{modified} = G \cdot \exp(-Gv_{avg\ all} / Gv_{avg\ channel}) \quad (3)$$

其中

$G_{modified}$: 修正過後的灰階振幅

$Gv_{avg\ all}$: 整張畫面的灰階平均值

$Gv_{avg\ channel}$: 測點的灰階平均值

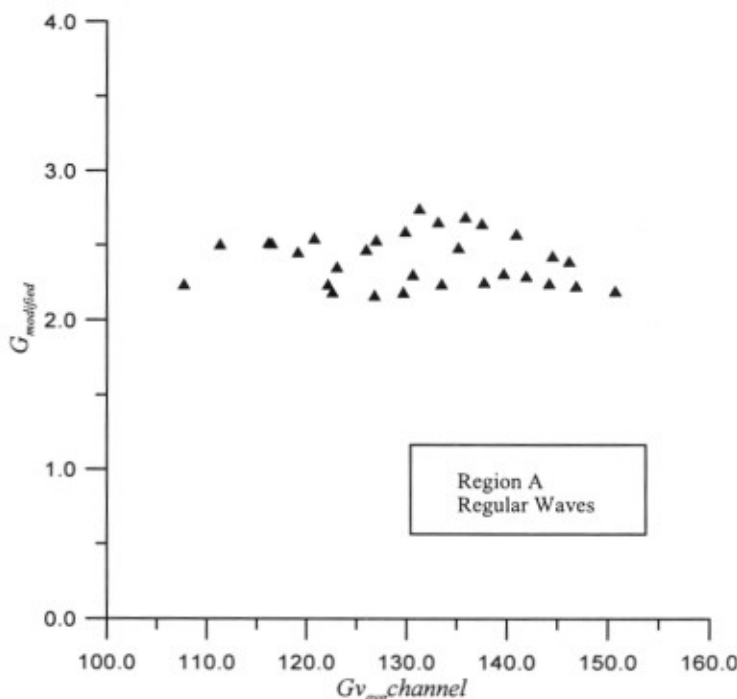


圖 6 修正後的灰階振幅與平均灰階值關係圖

4.2 遙測規則波週期結果

本研究的目的之一是期望能將 CCD 所拍攝的波動畫面在轉換計算後，得到量化的波浪統計參數。首先討論的是波浪週期計算；灰階序列經零上切法定義出灰階的週期序列後，再進行計算。圖 7 為 A 區規則波灰階序列計算的波浪週期與波高計的比較結果，圖中的縱軸代表波高計的量測結果；橫軸則為影像序列的計算結果。圖中 45° 的斜線代表前述兩者的等值線；大致上來說，CCD 遙測的波浪週期幾乎等於波高計的量測結果，兩者間的相對誤差平均值為 0.005；相對誤差的計算方式表為式 4 (Shahin 等

人, 1993)。接續再將攝影機鏡頭轉向拍攝 B 區, 此時鏡頭的焦距、拍攝區域與攝影機的距離、觀測範圍的大小和波場所接受的照度都已改變, 然而遙測和直接量測規則波週期兩者間的平均相對誤差為 0.006, 並未顯著的增加, 證實以影像遙測波浪週期的可行性。

$$err = |Val_{wave\ gauge} - Val_{image}| / Val_{wave\ gauge} \quad (4)$$

其中

$Val_{wave\ gauge}$: 由波高計量測計算的波浪統計參數值

Val_{image} : 由遙測影像量測計算的波浪統計參數值

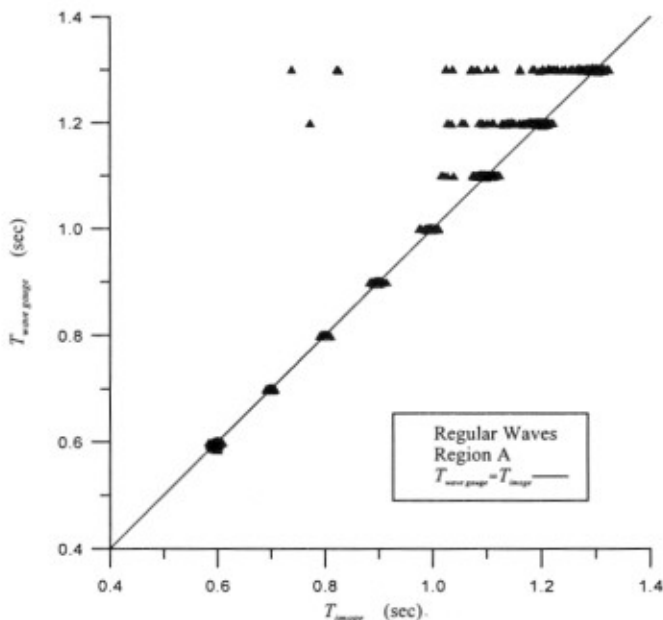


圖 7 波高計與影像序列計算波浪週期比較圖

另外, 由圖 7 的結果發現, 在規則波波週大於 1.1 秒時, 圖上的結果開始產生偏離。檢視波浪週期等於 1.1、1.2 和 1.3 秒時的平均相對誤差, 其分別為 0.005、0.008 和 0.013, 並未顯著的增加。所以, 圖上所顯示的記號雖然較為發散, 但根據向對誤差的結果來看, 大部分的結果仍應座落於等值線的附近。由於圖上表示結果的符號相互重疊, 所以也就無法顯示出其分佈聚落多寡的特性。然而, 不可否認的, 隨著波浪的週期愈大, 相對誤差也就愈大。檢查每個測點的相對誤差後發現, 產生偏離程度較大的測點, 往往是在畫面中邊緣的測點, 這是因為愈接近影像的邊緣, 其扭曲的程度也就愈大 (Schmalz, 1992)。另外, 週期愈大, 波長也就愈長, 相對的波浪表面坡度也

就愈小, 對光源的反應也就愈不明顯, 相對的, 以灰階序列所計算波浪週期的誤差也就愈大。

4.3 規則波波高與灰階振幅間轉換函數之計算

前述前人研究中 Klinke (1996)和 Lubard 等人 (1980)提到, 影像的灰階振幅與波浪的斜率成正比且相關性較高, 其分佈的特性會受到波浪週期所影響。因此本節將波高計量測結果所計算的波浪斜率置於圖的縱軸, 橫軸則是以影像序列計算的灰階參數的排列組合。由各參數組合計算的回歸式做為影像中灰階振幅和實際對應波高之間的轉換函數, 藉由比較各轉換函數的推估波高與實測值之間的相對誤差, 找出最適當的轉換函數, 做為最後的結果。圖 8 為利用 A 區規則波實驗結果回歸精度最佳的轉換函數, 其中橫軸參數為灰階振幅除以週期, 分佈的結果呈線性分佈。轉換函數為:

$$H = 0.01449 \cdot T^{-1} G_{modified} \cdot L \quad (5)$$

利用此轉換函數, 在已知水深區域裡, 經過遙測攝影計算波浪的週期後, 可以用分散關係式計算波浪波長(L)後, 推估波高。

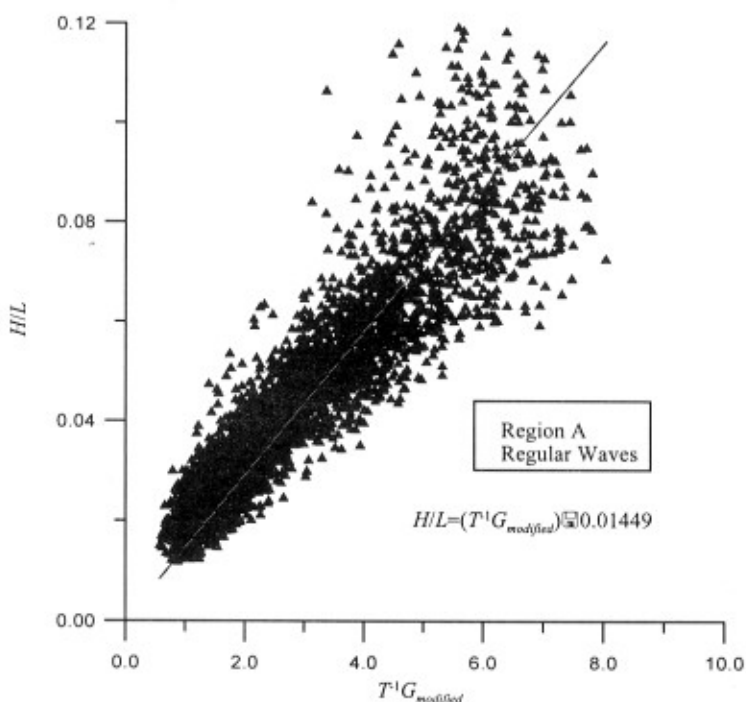


圖 8 波高與灰階振幅轉換函數回歸結果

圖 9 為 A 區 30 個測點直接量測與推估波高的比較結果, 其均勻地分佈於等值線的兩側, 相對誤差為 0.15。由於實驗時水池裡並無設置任何地形和結構物, 水深保持

恆定，因此，整張畫面所有測站量測得的波高應保持一致。另外，Bracewell (1995)提到利用平均的方式可以降低數據的標準偏差，所以，將 30 個測點的量測結果做平均進行比對，其相對誤差則降為 0.06(圖 10)，數據分佈範圍過大的情形則不再出現，計算的結果則均勻的分佈於等值線附近。另外，將轉換函數應用於 B 區，其轉換與實測波高的平均相對誤差為 0.16，而將 30 個測點的量測結果做平均進行比對，其相對誤差則降為 0.07。此誤差量與 A 區的計算結果十分接近。由上述計算結果，證實本研究提出的轉換函數適合將水槽裡任一區塊的拍攝結果進行波高轉換。

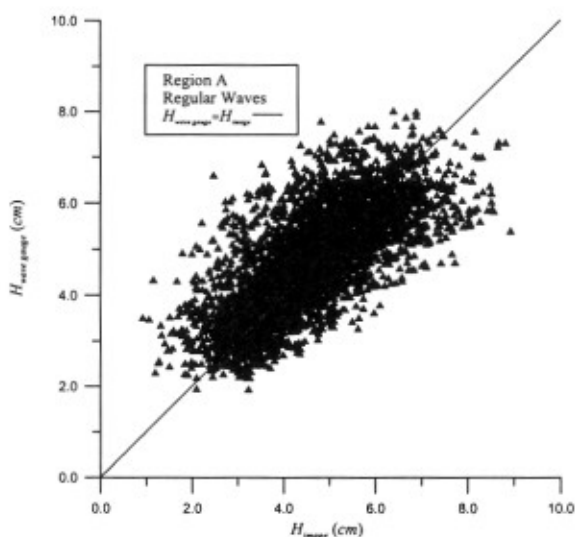


圖 9 遙測與實際量測波高比較圖

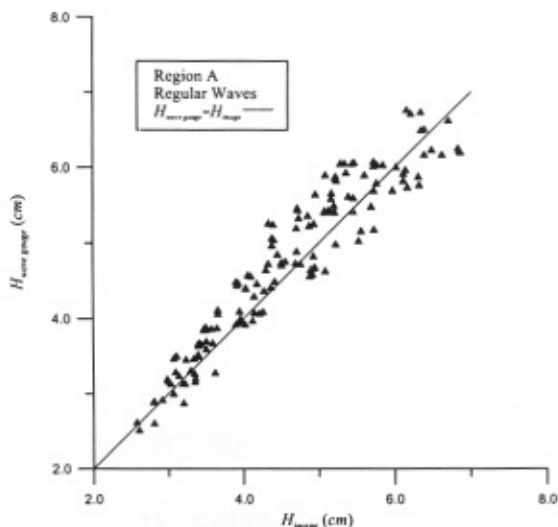


圖 10 遙測與實際量測平均波高比較圖

表二是根據各週期規則波的波高相對誤差表。由表中的相對誤差可以發現，當波浪週期小於 0.7 秒和大於 1.2 秒時，相對誤差會急遽的增加，也就是說較適合以影像遙測進行實驗的波浪週期為 0.7 秒至 1.2 秒之間。

表二 波高相對誤差表

實驗週期 $T(sec)$	相對誤差
0.6	0.18
0.7	0.16
0.8	0.13
0.9	0.11
1.0	0.14
1.1	0.15
1.2	0.16
1.3	0.21

4.4 不規則波遙測結果

將遙測不規則波影像的灰階序列以零上切法切割成數個波後，再將每個波的週期、灰階振幅和波長代入轉換函數推估波高後，可以得到灰階序列相對應的波高和週期序列。經過示性波法排序計算後，可以推估波場裡的示性波高($H_{1/3 \text{ image}}$)和示性週期($T_{1/3 \text{ image}}$)。

圖 11 為 B 區 30 個測點實測與遙測示性週期的結果。由結果發現，兩者的相對誤差為 0.08。計算的結果絕大部分座落於等值線上方，也就是說，遙測週期有低估的現象。波場的示性週期愈大，遙測結果偏離的程度也愈大。同樣的 A 區也發生相同趨勢的計算結果，相對誤差為 0.05。

由上述結果得知，不規則波實驗遙測的示性週期普遍都比實測結果短，推測發生的原因可能是記錄受到雜訊的干擾，形成誤差。為了證實遙測週期記錄是受到雜訊的干擾而產生誤差，將 A 區、測點 18 的部分灰階時間序列表示於圖 12。造波的示性週期為 1.0 秒、示性波高則為 3.25 公分。從圖上以橢圓虛線標示的部分可以發現，灰階序列的波形並不連續，會出現毫無變動的水平波形或是呈鋸齒狀等不平滑的現象。而這些微小的雜訊，如果出現於零水位面線附近，在以零上切法切割波浪時，則會多切割出數個週期極短的小波，而計算的示性週期也會因此而變短。

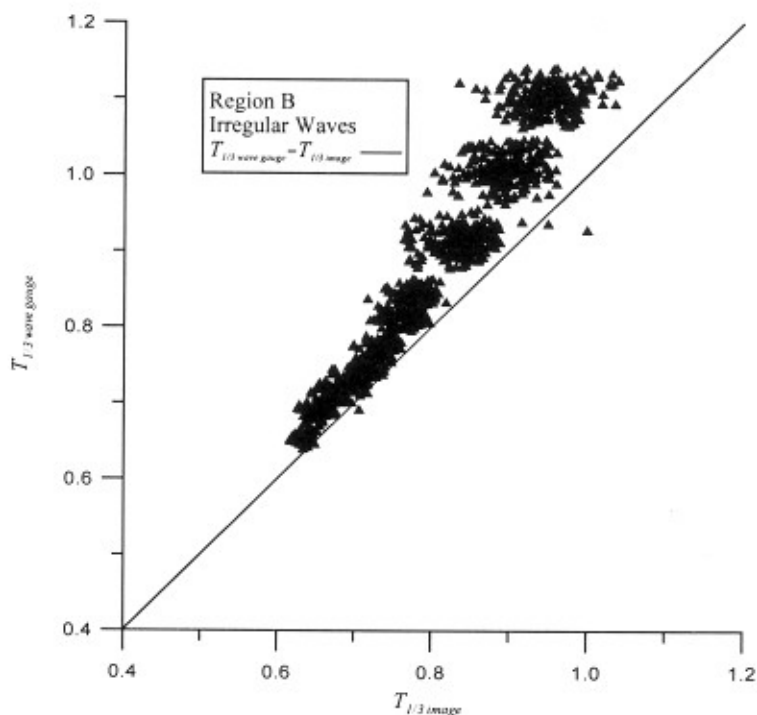


圖 11 遙測與實際量測週期比較圖

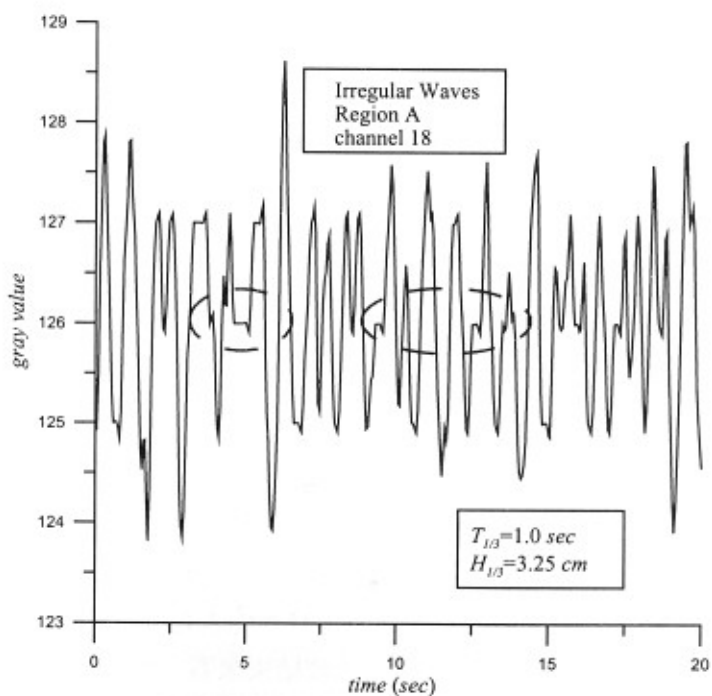


圖 12 不規則波灰階時間序列

就遙測波場示性波高的結果來看, A 區 30 個測點的實測與遙測示性波高的整體的相對誤差為 0.108, 如將 30 個測點示性波高平均後, 其平均的相對誤差則降為 0.07。對於 B 區 30 個測點實測與遙測示性波高波高的結果來看, 整體的相對誤差為 0.11, 而圖 13 為畫面中 30 個測點平均示性波高的計算結果, 實測和推估值十分吻合, 其平均的相對誤差降為 0.03, 精度相當高, 證實轉換函數可應用於不規則波的波高轉換。另外, 由數據的分佈情形來看, 所計算的波高均勻的分佈於等值線兩側, 並未出現高估或是低估的現象。

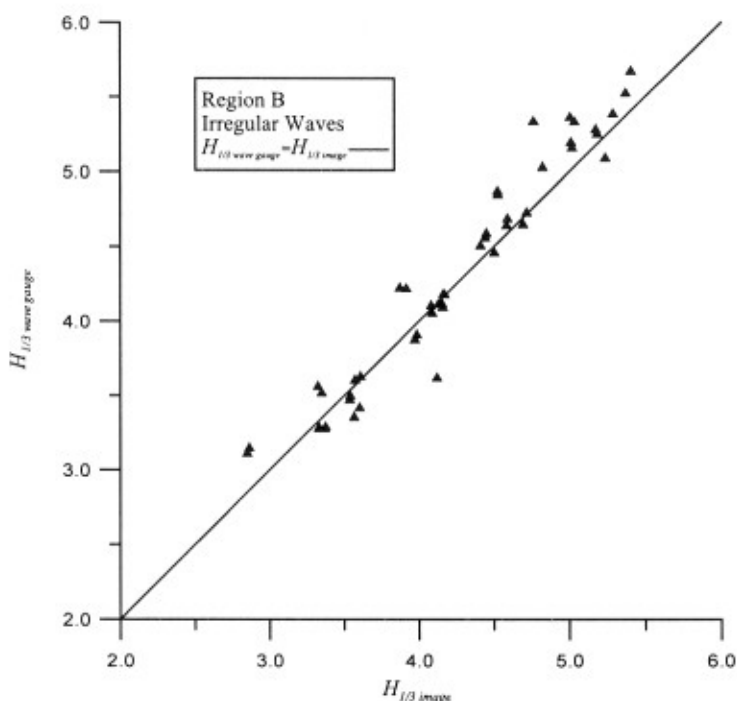


圖 13 B 區平均遙測與實際量測波高比較圖

4.5 實驗誤差

由上述規則波與不規則波實驗結果的相對誤差來看, 遙測波高部分的平均相對相對於遙測波浪週期的精度差, 對於造成本研究誤差的原因歸納如下:

遙測影像的解析度是有限制的(Schmalz, 1992), 而所對應的遙測精度則受制於影像的解析度。本研究影像的解析度為 320 像素 × 240 像素, 相對於 A 區和 B 區的面積來說, 一個像素的解析度分別為 $2.38 \times 1.41 \text{ cm}^2$ (A 區) 和 $1.79 \times 1.29 \text{ cm}^2$ (B 區)。從解析度與實驗波高範圍 (2.64~6.74 cm) 的比較結果來看, 解析度與波高的尺度相差並不甚大, 因此也隱含著一定程度的誤差。解決的方式是將攝影機鏡頭拉近, 解析度則自然提高, 然而同時拍攝面積也會隨著縮小, 由於本研究的目的是在發展觀測大範圍面

積的遙測系統，因此，在解析度與入鏡面積的考量中不得不做忽略其一的選擇。

還有另一個原因也有可能造成實驗的誤差；以 CCD 攝影進行量測和以波高計進行量測的實驗並不是同步進行的，這是因為波高計陣列會遮住波場波動的影響，無法進行分析，所以兩個量測系統是在相同的實驗條件下分別進行量測。雖然兩次實驗的波浪條件相同，且量測點也固定，然而，無法否認的，其中必然含有某種程度的誤差。

比較本實驗與其它相關的實驗來看，Jähne 和 Schults (1992)指出影像的解析度會隨著光源非線性折射增加而迅速的降低；另外，隨著波浪表面坡度的增加或是量測點愈接近畫面的邊緣，其解析的精度也愈差。而在所謂理想燈源的照射下，也就是在所謂的均一光源的照射下，發現在波浪表面坡度在接近 1 時，仍會有 8% 的量測誤差；當不均一的非線性因素存在時，如影像的扭曲或是非均一的光源照射，量測誤差則會增加到 21.1%。需注意的是，該實驗的面積從未大於 $80 \times 80 \text{ cm}^2$ ，僅為本研究的 1/40 左右，然而其與本研究的精度基本上是相同的。其他類似商業用途的量測儀器，精度也約在 10% 左右；例如德國的 GKSS 單位發展的 WaMoS (Wave Monitoring System) 系統，因此，就遙測波浪的波高或是表面坡度而言，其仍隱含有一定的問題，有待解決。

然而利用平均的方式，可大量降低實驗結果的標準偏差，使得實驗結果較不會因為單一測站或是影像任一區塊受到不確定因素的干擾，而失去表性 (Bracewell, 1995)，由本研究以 30 個測站的平均結果進行比較後，可以發現其相對誤差至少降低了 2/3 左右。

五、結論

本研究共進行了規則和不規則波的實驗，期望能以 CCD 攝影系統觀測水池的波場變化。從拍攝的影像中計算波浪特性，進而取代傳統較為費時和不經濟的現場直接量測方式。

就規則波的實驗結果來看，將波高計量測的水面變化與遙測影像所擷取的灰階序列計算比較，證實以影像遙測波浪週期的可行性後，計算灰階振幅與波高之間的轉換函數，轉換與實測波高間的平均相對誤差最大為 0.16，經過將 30 個測站的實驗結果平均後再行比較，其相對誤差則降為 0.05 左右。較適合以本研究所提出的實驗方法進行遙測的波浪週期範圍為 0.7 秒至 1.2 秒之間。另外，對於不均勻照度對計算結果的影響本文已提出修正的公式，並併入轉換函數，因此本研究所提出的轉換函數適用於造波水槽裡任何一個區域的波高轉換，且精度能保持固定，且無需任何進一步的修正和率定，因而確立其適用性和應用價值。

然而，就目前的實驗方法，在波向、燈源或是水深條件改變時，不可避免的仍會

影響灰階的振幅值, 導致所推估的轉換函數仍須進一步的修正。唯一不變的是, 灰階振幅與波高關係的分佈趨勢大致都成正比的形式; 這也就是大多相關的研究皆是以無因次化的形式來表示影像遙測結果的原因, 然而這樣的表示方式往往不符合工程上的需求。所以本研究初始時是先固定幾種變因, 找尋出灰階振幅與波高間的關係後, 再進行後續的發展。Stillwell 和 Pilon (1974)也提到以影像遙測時, 其機制大致會受到光的折射、反射和散射所影響。因此, 隨著光源、波向和攝影機位置的不同, 灰階的振幅也會隨著改變。然而, 也並非任意的佈置即可進行量測, 這是因為, 如水體與光源成鏡面反射, 所拍攝的畫面即會產生亮塊, 無法進行分析。根據本研究實驗佈置時的經驗, 若是光源與攝影機成對向的佈置, 亮塊產生的情形最為明顯, 而光源與攝影機設置於同向, 亮塊的現象則最少。

另外, 當波浪的週期愈大, 相對誤差也就愈大。檢查每個測點的相對誤差後發現, 產生偏離程度較大的測點, 往往是在畫面中邊緣的測點, 這是因為愈接近影像的邊緣, 其扭曲的程度也就愈大 (Schmalz, 1992)。另外, 週期愈大, 波長也就愈長, 相對的波浪表面坡度(H/L)也就愈小, 對光源的反應也就愈不明顯, 相對的, 以灰階序列所計算波浪週期的誤差也就愈大。

謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「多方向波場中離岸堤前反射率之研究」(編號 NSC 90-2611-E-019-002)和「利用高感度遙測系統 CCD 進行實驗水槽波浪觀測」(編號 NSC 90-2611-E-019-001)之研究成果, 承蒙國科會經費之贊助使本研究得以順利完成, 謹至感謝之意。

參考文獻

1. 王潤生 (1998) 「信息處理叢書-圖像理解」, 國防科技出版社, 北京, 第145-183頁。
2. 莊勝雄 (1998) 「攝影進階 I」, 授學出版社, 台北, 第二篇, 第20-39頁。
3. Bracewell, R. N. (1995) *Two-Dimensional Imaging*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 267-283.
4. Gotwols, B. L., and Irani, G. B. (1980) "Optical determination of the phase velocity of short gravity waves," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, No. C7, pp. 3964-3870.
5. Jähne, B., and Riemer, K. S. R. (1990) "Two-dimensional wave number spectra of small-scale water surface waves," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. C7, pp. 11531-11546.

6. Jähne, B., and Schults, H. (1992) "Calibration and accuracy of optical slope measurement for short wind waves," Optics of the Air-Sea Interface: Theory and Measurement, Leland E. ed., *Proc. SPIE* 1749, pp. 222-233.
7. Jähne, B. (1997) *Digital Image Processing*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 289-341.
8. Keller, K. C., and Gotwols, B. L. (1983) "Two-dimensional optical measurement," *Applied Optics*, Vol. 22, No. 22, pp. 3476-3478.
9. Klinke, J. (1996) *Optical Measurement of Small-scale Wind-generated Water Surface Waves in the Laboratory and the Field*, Ph.D. dissertation, University of Heidelberg, Heidelberg, pp. 1-50.
10. Lubard, S. C., Krimmel, J. E., Thebaud, L. R., Evans, D. D., and Shemdin, O. H. (1980) "Optical image and laser slope meter intercomparisons of high-frequency waves," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, No. C9, pp. 4996-5002.
11. Schmalz, M. S. (1992) "Determination of the sea topography and its effect upon the restoration of imagery acquired by viewing through the sea surface," Optics of the Air-Sea Interface: Theory and Measurement, Leland E. ed., *Proc. SPIE* 1749, pp. 102-117.
12. Senet, C. M., Seemann, J., and Zimer, F. (2000) "Hydrographic parameter maps deduced from CCD image sequences of the water surface supplement by in-situ wave gauges," *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IGRASS, Vol.2, pp.843-846.
13. Shahin, M., Oorschot, H. J. L. Van, and Lange, S. J. De (1993) *Statistical Analysis in Water Resources Engineering*, Balkema, Netherlands, pp. 40.
14. Stilwell, D. Jr., and Pilon, R. O. (1974) "Directional spectra of surface waves from photographs," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 79, No. 9, pp. 1277-1284.
15. WaMoSII®: Technical data sheet and system requirement & benefits" [online], available from World Wide Web: <http://www.oceanwaves.de/technicals.htm>.

2003 年 2 月 11 日 收稿

2003 年 7 月 23 日 修改

2003 年 7 月 28 日 接受