

# CCD 遙測波浪系統之開發與研究

周宗仁<sup>1</sup> 林騰威<sup>2</sup> 尹 彰<sup>1</sup> 石瑞祥<sup>3</sup>

## 摘要

本研究運用遙測技術，以高感度電耦合元件 (CCD, Charge Coupled Device) 影像攝影機，於實驗水槽拍攝水面波動情形，配合波高計的量測，將這兩種系統量測的數據作回歸，建立轉換函數以影像灰階測量波高。研究結果發現對單方向及多方向不規則波量測的結果，誤差皆約在 16% 以下。

## Development of Wave Height Determinations by Image Sequences of High-sensitivity CCD

C. R. Chou T. W. Lin J. Z. Yim R. S. Shih

## ABSTRACT

Investigations of wave height measurements using the remote sensing techniques by CCD camera were carried out. Regular waves as well as unidirectional and multidirectional irregular waves were studied, respectively. The transfer function was obtained by comparing the gray magnitudes from the image sequences and the results of wave gauges measurements. The average relative errors were found to be less than 16% for both unidirectional and multidirectional irregular waves.

## 一、前言

一般在實驗水槽或現場進行量測時，大多使用波高計，其測量結果準確。進行港池波高分析時，需要重複及多次的移動波高計，既耗時又麻煩，並且依比例縮小的現場地形，波高計的感應金屬桿及支撐架可能對波場造成影響。在現場運用時，除了會礙到漁事工作及船隻航行，儀器受風雨及海浪侵襲易受損，人員在儀器架設上亦具相當的危險性。故隨著科技的進步，遙測系統不需要搭載在特定或固定的觀測點上，且能夠快速地一次擷取大範圍的資料及減少人力及物力的消耗。

遙測技術有相當多的研究及方法，如較早期的立體照相攝影，Horikawa 等 (1972) 利用兩部像機分別架設於不同的兩部航空器上同步拍攝，製成立

體相片後分析其能譜，計算其波長及波向。後來 Sasaki 等 (1976) 利用兩熱氣球各載一台照相機，用繫纜固定高度，在風速小於 5m/s 時拍攝。近年來雷達系統逐漸被研究使用，Gangeskar (2000) 利用船用雷達及 X-band 航空雷達於北海 Gullfaks C 鑽油平台所觀測的研究資料，分析波浪變化對雷達影像的影響，得到與頻譜參數的關係，進而推估波高，但是此方法對波谷測量時，有可能受到波峰的遮蔽，造成波高低估的現象。另外有些是以衛星來遙測，但是此方法的精度受到有些軍事上的限制，訊號傳遞上亦會受到大氣的干擾而有偏差。

一般遙測都是運用雷達偵測或攝影的方式取得資料，這兩種方法將傳回的訊號分別以紋理及圖像來表示。值得注意的是，以攝影的方式進行遙測時，影像裡的反光強度是受到波浪表面的斜率影響，並非波高 (Gangerkar, 2000)。

對於以遙測系統所得的資訊與實際海面上利用波高計求得的波動變化間的關係，至今尚未有較明

1. 國立台灣海洋大學海海工程學系教授
2. 國立台灣海洋大學海海工程學系博士班研究生
3. 東南技術學院土木工程系助理教授

確的結果。Chou 等 (2003) 曾對規則波及單方向不規則波進行一系列研究，當時是對規則波觀測，將資料回歸並建立轉換函數，將所有的規則波、單方向及多方向不規則波波浪資料代入推估波高，結果發現此轉換函數對規則波及單方向不規則波的平均相對誤差皆小於 16%，但在多方向不規則波的推估上誤差甚大，故此轉換函數不適用在多方向不規則波的推估上，這誤差之來源可能來自多方向不規則波所呈現的畫面，由於多方向不規則波屬於時間及空間上的隨機性變動，大波上疊有小波，縱橫各方向的波重重疊疊，不像規則波與單方向不規則波那樣有明顯的亮紋。所以本研究從多方向不規則波的觀測著手，期能在多方向不規則波之觀測上有較好的結果。

本研究在國立台灣海洋大學海洋工程綜合實驗館內的平面水槽進行，運用遙測技術，以高感度電偶元件影像攝影機拍攝實驗水槽中的水面波動情形，配合波高計的量測結果進行比較及回歸，試建立出兩者間的轉換函數。

## 二、實驗設備及量測方法

### 2.1、實驗設備及佈置

本實驗之平面水槽長 50 公尺、寬 50 公尺、深 1.5 公尺。實驗水深為 0.4 公尺。造波裝置是七組日本本田工業株式會社生產之蛇型造波機組組成，每組造波機擁有八塊造波板，每塊造波板寬度為 0.5 公尺，造波裝置總寬度達 28 公尺，可造出任一方向 ( $0 \leq \theta \leq \pi$ ,  $\theta$  為造波主要方向，最佳造波範圍  $30^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$ )、不同週期 (0.5 sec~5sec) 之規則波與不規則波，最大波高為 20 公分。

實驗使用 31 根電容式波高計作為量測波高之用，其中 1 根置於造波板前 4.3 公尺量測入射波，另外 30 根則依照實驗區與驗證區的需要來佈置用來量測波場變化。

攝影儀器為高感度 CCD 遙測攝影系統，固定於造波裝置之右側屋頂上，離水面 7.4 公尺，該攝影機除可以拍攝到一般的可見光外，亦能感應到 75 毫微米以上之紅外光。攝影機的底端裝有遠端遙控裝置，可由控制室內控制其焦距、角度、及攝影範圍，並於鏡頭上加一組偏光鏡以消除鏡頭內水面的反光與強光，使得將來分析影像時，減少因為水面

反光的亮點及倒影而影響分析結果，以降低誤差。攝影機所拍攝到之視訊直接藉由影像擷取卡擷取後儲存為 AVI (未壓縮之視訊) 檔來進行資料分析。

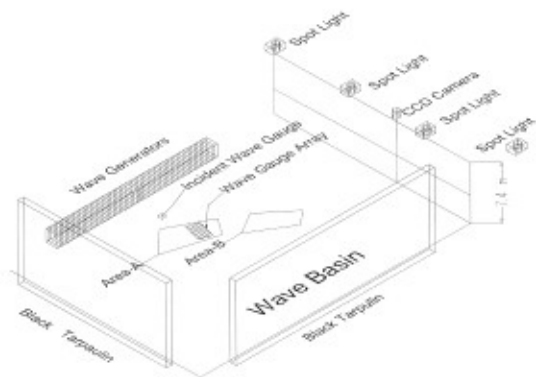


圖 1 實驗配置圖

為了避免其他光源對實驗造成干擾，本實驗在晚上光源恆定下進行，實驗所採用之光源為四盞 400W 的投射燈。如圖 1 所示，為了遮蔽屋樑及四周的倒影，將水槽的上方、左側、後方都分別以黑色布幕遮蔽。

### 2.2、資料量測與分析方法

本實驗分為實驗區 (A 區) 及驗證區 (B 區) 兩個部分，除區域位置不同外，量測方法及分析方法皆相同。A 區的位於實驗水槽的正中央，B 區則是移到水槽中央偏右側距離光源較近的位置，如圖 3。先利用波高計量測，將波高計陣列移去後，再以 CCD 攝影機遙測。利用 A 區的實驗資料進行回歸分析，再以 B 區的實驗資料進行驗證。

實驗造波所使用的標準風浪頻譜為 JONSWAP 頻譜：

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

其中：

$\alpha \approx 0.081$  (the Phillips constant)

$f_p$  : 主頻 (the peak frequency)

$\gamma = 3.3$  能量集中參數 (the peak enhancement factor)

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & ; f \leq f_p \\ 0.09 & ; f > f_p \end{cases}$$

在 A 區及 B 區分別進行多方向不規則波實驗，實驗採五種不同主頻，主方向為 90 度，且每種主頻分別採三種不同的散佈參數 (wave peakedness parameter,  $S_{max}$ ) 與三種波高，實驗條件如表 1 所示。

表 1 多方向不規則波的試驗條件

多方向不規則波			
主頻 (1/sec)	主方向 (degree)	散佈 參數 ( $S_{max}$ )	波高範圍 ( $H_{1/3}$ , cm)
0.95	90	10	2.07 ~ 4.89
		25	2.60 ~ 5.50
		50	2.81 ~ 5.77
1.06		10	1.81 ~ 4.45
		25	2.78 ~ 6.48
		50	3.01 ~ 5.91
1.19		10	2.44 ~ 4.92
		25	2.82 ~ 5.73
		50	2.94 ~ 5.81
1.36	10	2.03 ~ 4.29	
	25	2.37 ~ 5.25	
	50	2.53 ~ 5.43	
1.59	10	2.47 ~ 5.02	
	25	2.67 ~ 5.17	
	50	2.58 ~ 4.83	

本實驗分析方法是從空間-時間域著手。分析連續畫面中與波高計相對位置的灰階變化，並與波高計取得的資料相互比對其結果。

實驗分別以規則波與不規則波進行，波高計資料之採樣頻率為 20Hz，共擷取 2048 筆資料，影像約錄製 102.4 秒。波高計收集之資料以零上切法 (zero up cross) 做分析，得有義波波高  $H_{1/3}$  及有義波週期  $T_{1/3}$ 。攝影機所拍攝的影像，藉由影像擷取卡將其儲存為視訊檔，經由影像剪輯軟體，剪輯為每秒 20 張的連續圖片，同樣以零上切法分析灰階振幅序列，以平均灰階值 ( $G_{AVG}$ ) 來當基準，可得

與有義波意義相當的有義灰階振幅 ( $G_{1/3}$ ) 及有義灰階週期 ( $T_{G1/3}$ )，並將兩者的結果相互比較分析得轉換函數。

本實驗是以黑白的方式拍攝，所以影像會以不同的灰階來表現，最亮的灰階值為 255 (白色)，最暗的灰階值為 0 (黑色)。實驗進行時，拍攝畫面的解析度為 320×240 (素像)。Jähne (1997) 認為雜訊、非恆定的照明與非均一性的背景會使得拍攝畫面出現異常變化，這些都會直接影響到計算的結果。為了減少異常現象的影響，我們將影像畫面的數位訊號加入平滑視窗處理。適度平滑的可避免圖片中的灰階出現奇異值，對結果造成重大影響。

### 三、結果與討論

Jähne 等 (1990) 認為海面波動照片明亮密度決定於光源的平均入射角度和光從波面反射至攝影機的角度，因此照片上的亮度會沿著光源方向成梯度變化，為了保持整個畫面光源的均一性，須對此現象加以修正。研究中也嘗試對此作修正，但結果並不好。

Chou 等 (2003) 曾對規則波及單方向不規則波做過研究，也發現灰階振幅隨著亮度的減少而增大，圖 2 為規則波試驗時，各測站間的波高與  $G_{AVG}$  及  $G_m$  間的關係。其中  $G_{AVG}$  表示平均灰階值， $H_m$  表示由波高計測得的平均波高， $G_m$  表示平均灰階振幅，為了將此三個參數表示在同一張圖上，所以將  $H_m$  及  $G_m$  分別乘以 10 倍來表示。由此圖看來， $G_m$  似乎有隨亮度而改變的趨勢，將  $G_{AVG}$  及  $G_m$  另以圖 3 表示， $G_m$  與亮度成反比，此結果與 Jähne 等 (1990) 相同。

Chou 等 (2003) 藉由對規則波的觀測及分析，推估規則波及不規則波的波高，建立的轉換函數適用在規則波及單方向不規則波波高的推估上，對於多方向不規則波的推估結果與實際量測結果誤差甚大。檢討其因，發現針對單方向不規則波及規則波而言，灰階振幅會隨著亮度變暗而增大，這是由於光的能量在波峰線處較集中，並將能量傳遞到波峰線的每一部分，就像光纖電纜，所以在亮度較暗的地方，灰階並不會因而減小，波谷部分則因光源較弱而灰階較小，所以灰階振幅增大。在多方向不規則波裡的統計結果發現，雖然亮度會隨著距離而變

暗，卻未直接影響到灰階振幅的結果，如圖 4 所示，多方向不規則波試驗時，各測站間的波高與  $G_{AVG}$  及  $G_m$  間的關係。由此圖看來， $G_m$  並不會隨著亮度的不同而起伏變化。可能是多方向不規則波屬於時間及空間上的隨機性變動，沒機會形成一連串之波峰線的緣故。

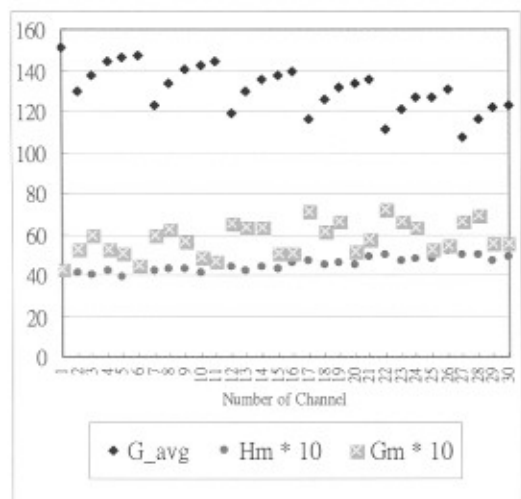


圖 2 規則波試驗時，各測站間的波高與  $G_{AVG}$  及  $G_m$  間的關係圖

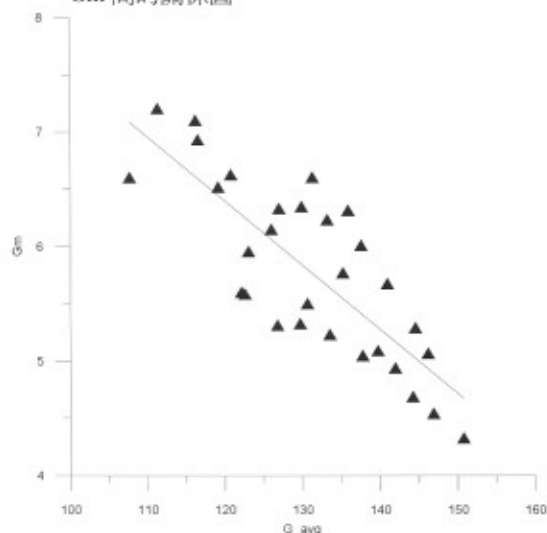


圖 3 此圖為規則波的  $G_{AVG}$  及  $G_m$  的關係圖

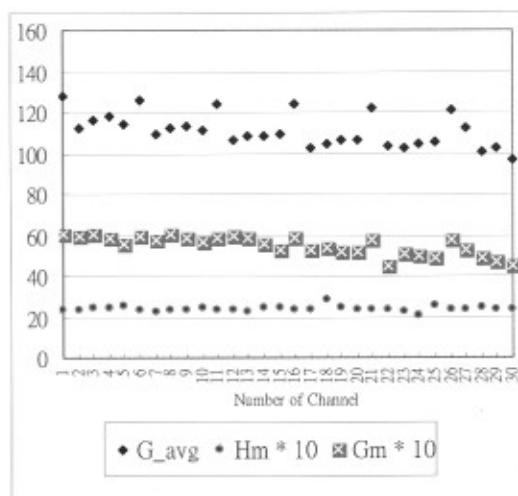


圖 4 多方向不規則波試驗時，各測站間的波高與  $G_{AVG}$  及  $G_m$  間的關係圖

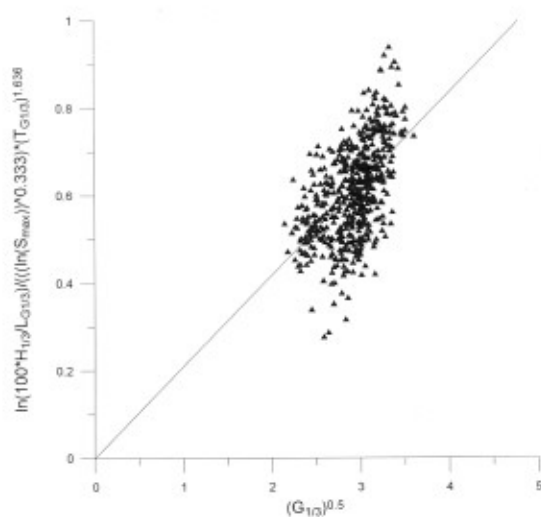


圖 5 回歸曲線圖

A 區的實驗結果，經過各參數的排列組合後，發現以下的線性相關較好，如圖 5。回歸公式為：

$$\ln\left(\frac{H_{1/3}}{L_{G_{1/3}}} \cdot 10^2\right) \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{\ln(S_{max})}} \cdot (T_{G_{1/3}})^{1.218} = 0.2463 \cdot \sqrt{G_{1/3}}$$

其中

$H_{1/3}$ ：有義波波高。

$L_{G1/3}$ ：為灰階之週期 ( $T_{G1/3}$ ) 經由分散關係 (dispersion relation) 計算的虛擬波長。

$S_{max}$ ：散佈參數。

$T_{G1/3}$ ：為灰階之週期。

$G_{1/3}$ ：灰階振幅。

灰階振幅與波高之間的轉換函數可表示為

$$H_{1/3} = 10^{-2} \cdot L_{G1/3} \cdot \exp \left[ \frac{0.2463 \cdot \sqrt{G_{1/3}}}{\sqrt[3]{\ln(S_{max}) / (T_{G1/3})^{1.218}}} \right] \quad (1)$$

運用此轉換函數，在已知水深裡，將遙測攝影計算波浪週期，以分散關係式

$$\sigma^2 = gh \tanh kh \quad ; \sigma = 2\pi / T \quad ; k = 2\pi / L \quad (2)$$

求得波長，並將  $S_{max}$  代入即可推估該區的波高。圖 6 是應用轉換函數將在 A 區拍攝的灰階振幅轉換成波高之結果。橫軸是波高計的量測值，縱軸是推估值。每一點代表 30 個測站在每一次不同的實驗條件下的平均值，量測值與推估值大致延著等值線分佈，推估值與量測值的平均相對誤差為 17%。

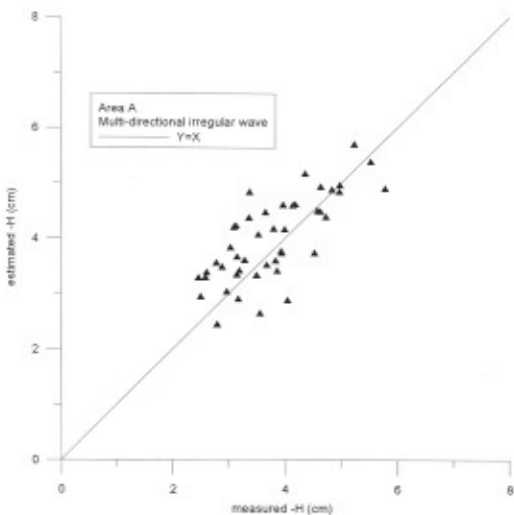


圖 6 A 區量測與推估波高比較圖

圖 7 是應用轉換函數將在 B 區拍攝的畫面轉換成波高之結果。整體看來，推估值略有高估的現象，但仍然接近測量值，平均相對誤差在 16.96%，由此誤差量接近 A 區的計算結果，由此證明，此轉換函

數可廣泛運用於任意區域使用。

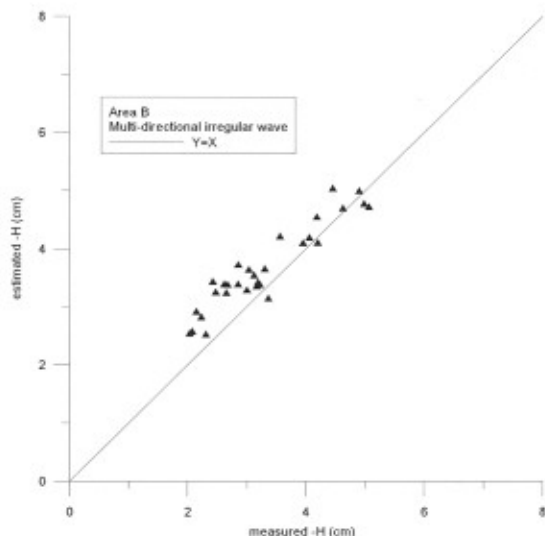


圖 7 B 區量測與推估波高比較圖

此轉換函數，在 A 區及 B 區的多方向不規則波試驗，平均誤差都約在 17%。故嘗試是否也能應用於單方向不規則波及規則波上。於 B 區進行單方向不規則波及規則波的試驗來驗證，單方向不規則波採五種不同的主頻 (0.95、1.06、1.19、1.36、1.59)，主方向為 90 度，每種主頻有四種不同波高，波高約在 2.03~5.02 公分之間。規則波亦採五種週期 (0.6、0.7、0.8、0.9、1.0)，每種週期有六種不同波高，波高約在 2.64~6.74 公分之間。在經過試驗及計算後，假設單方向不規則波及規則波的散佈參數 ( $S_{max}$ ) 為 75，則單方向不規則波與規則波的平均相對誤差分別為 9.48% 及 17.39%，根據 Jähne 等 (1990) 的想法對灰階振幅做下列簡單修正：

$$G_{modified} = G \cdot (G_{avg \ channel} / G_{avg \ all})$$

其中

$G_{modified}$ ：修正後灰階振幅值

$G_{avg \ all}$ ：整張畫面的時間序列的灰階平均

$G_{avg \ channel}$ ：量測點的時間序列的灰階平均

在 B 區單方向不規則波與規則波的相對平均誤差則分別由原先的 9.48% 及 17.39%，上升至 10.86% 及 17.94%。

## 四、結論

根據先前研究的經驗 (Chou, 2003), 刪除影像裡的最外圈測站, 只留下 7~9、12~14、17~19、以及 22~24 等 12 的測站, 然後重新回歸, 可以得到較好的結果。灰階振幅與波高之間的轉換函數修正為

$$H_{1/3} = 10^{-2} \cdot L_{G1/3} \cdot \exp \left[ \frac{0.2091 \cdot \sqrt{G_{1/3}}}{\sqrt[3]{\ln(S_{\max})} / (T_{G1/3})^{1.636}} \right] \quad (3)$$

在 A 區及 B 區多方向不規則波的平均誤差約為 15.2% 及 15.4%。而在 B 區的單方向不規則波及規則波的平均誤差為 15.87% 及 24.55%。由此看來, 對於多方向不規則波的平均相對誤差有些微的下降, 但對於單方向不規則波及規則波則是上升不少, 另外若將軍方向不規則波及規則波的灰階振幅加以修正, 則平均相對誤差也上升到 16.43% 及 24.95%。

對於誤差的來源可能有非均勻的照明、不充足的光源、以及攝影機的斜向拍攝所導致的畫面扭曲。由於斜向拍攝的結果, 畫面上的影像對應到現地其實是不規則的四邊形或梯形。以梯形來說, 畫面的上緣—距離攝影機較遠處, 亦即梯形的下底(較長的底), 畫面的下緣—距離攝影機較近處, 亦即梯形的上底(較短的底), 如圖 8 所示, 畫面是採 320×240 的解析度, 越接近攝影機的測站所包含的範圍會比遠處來得小, 因為以畫面的單點涵蓋範圍與波高計所量測的範圍來看, 畫面中測站所推估的波高應該可說是該區域的平均波高。

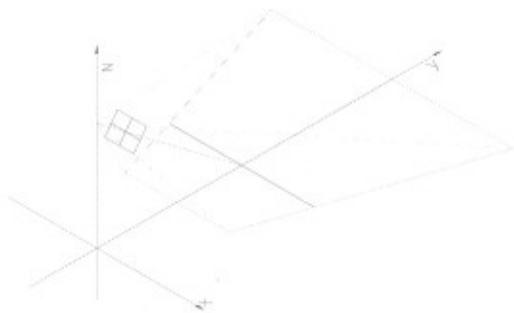


圖 8 攝影機斜拍導致畫面扭曲的示意圖

本研究目的在於藉由以攝影系統在實驗水槽中觀測波高, 建立起遙測拍攝與實地測量之間的轉換函數, 進一步期望能夠應用於直接觀測實地的波場變化。

自然現象中, 規則波與單方向不規則波存在的機會甚小, 本研究只對多方向不規則波的資料來做回歸分析。為了驗證回歸之轉換公式在任意區域使用的通用性, 除了進行多方向不規則波的試驗外, 也進行單方向不規則波及規則波的試驗驗證, 證實此轉換函數驗證在任意區域使用的妥適性。運用式 (3) 計算的波高與實測值之間的平均相對誤差約為 16%。

Chou 等 (2003) 所提之轉換函數適用於規則波及單方向不規則波, 本文在此提出之轉換函數則適用在多方向不規則波及單方向不規則波, 且灰階不需修正就可以直接利用式 (3) 進行轉換。兩者的回歸型式大不相同, 此因多方向不規則波屬時間與空間的隨機性, 波峰線的亮紋不明顯, 這點明顯與規則波及單方向不規則波的情形不同, 導致由規則波建立的轉換函數, 無法適用在多方向不規則波, 而由多方向不規則波建立的轉換函數, 也無法適用在規則波。

## 謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「CCD 遙測波浪系統之開發與研究」(NSC 91-2611-E-019-007) 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, 謹致感謝之意。

## 參考文獻

1. Chou, C. R., J. Z. Yim and W. P. Huang (2003) "Determining the hydrographic parameters of the water surface from image sequences of CCD camera," *Experiments in fluid.* (Accepted).
2. Gangeskar, R. (2000) "Wave height derived by texture analysis of X-band radar sea surface images," *Geoscience and Remote Sensing Symposium 2000, Proceedings IGRASS 2000, IEEE, Vol. 7, pp.2952-2959.*
3. Goda, Y. (2000) *Random seas and design of*

*maritime structures*, World Scientific, Singapore, pp.12-43.

4. Jähne, B. and K. S. R. Riemer (1990) "Two-dimensional wave number spectra of small-scale water surface waves," *Journal of Geophysical Research* 95, pp.11531-11546.
5. Johannes S. S. and L. Susanne (2001) "Ocean wave imaging using an airborne single pass across-track interferometric SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 1, pp. 38-45.
6. Kiyoshi Horikawa (1988) *Nearshore dynamics and coastal processes*, University of Tokyo press, pp. 399-401.
7. Senet, C. M., J. Seemann and F. Zimer (2000a) "Hydrographic parameter maps deduced from CCD image sequences of the water surface supplemented by in-situ wave gauges," *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGRASS*, Vol. 2, pp.843-846.
8. Senet, C. M., J. Seemann and F. Zimer (2000b) "Dispersive surface classification: Local analysis of optical image sequences of the water surface to determine hydrographic parameter maps," *Oceans 2000 MTS/IEEE Conference & Exhibition*, Vol. 3, pp.1769-1774.