

# 波浪浮標傾角校正與極值波高之研究

林立青<sup>1</sup>  
海洋能源與政策研究中心  
海洋大學

郭重言<sup>2</sup>  
測量及空間資訊學系  
成功大學

許泰文<sup>3</sup>  
海海工程學系  
海洋大學

## 摘要

波浪浮標所觀測之極值波浪包含颱風波浪及高度非線性作用之瘋狗浪(rogue waves)或異常浪(freak waves)。連續時間之觀測雖可增進極值波浪之來源與影響分析，但波浪浮標之加速度值轉換成水位值之過程可能受到內部慣性矩所產生之低頻能量、資料校正、人為誤差、電子雜訊、浮標結構之擾動後振盪及傾角等變化。台灣波浪浮標所觀測之波浪於極端事件之作用下最大波高值具有大於示性波高4-10倍之變化，且於淺水波條件下波高與水深比值亦超過臨界碎波條件(波高極限須小於0.55倍之水深，探究其原因可能為觀測傾角對於超過理論值並無從浮標的自體座標(body frame)改正為相對於地球座標(Earth frame)。本研究利用浮標觀測之加速度及其求得各水平分量之傾角(pitch and roll)進行對垂直加速度之方向餘弦矩陣(Direction Cosine Matrix)之校正，傾角改正水位變化約為20至50%。

關鍵字：極值波高、浮標傾角、浮標

## 一、前言

目前波浪之觀測是經由浮標內部之加速度計紀錄水位變化之加速度反應，然而該種方法僅為間接方式將波浪運動之加速度轉換成水位變化。從過去的觀測資料中，颱風或極端事件之作用下最大波高值具有大於示性波高4-10倍之變化，且於淺水波條件下最大波高與水深比值亦超過臨界碎波條件(波高極限須近似於0.55倍之水深)(Massel, 1996; 1998)。

中央氣象局於2007年柯羅莎(Krosa)期間，龜山島浮標觀測到示性波高為23.9公尺，其最大波高則為29.1公尺。就最大波高與水深(28公尺)之比值約為1.03甚大於淺水波理論值0.55。顯示該波浪條件已超過碎波條件(Liu et al., 2008)。因此上述所觀測之極值波高特性是否存在之討論，則需要考量到以下的多個因素。

波浪浮標所觀測之極值波浪包含颱風波浪及高度非線性作用之瘋狗浪(rogue waves)或異常浪(freak waves)。連續時間之觀測雖可增進極值波浪之來源與影響分析，但波浪浮標之加速度值轉換成水位值之過程可能受到內部慣性矩所產生之低頻能量、資料校正、人為誤差、電子雜訊、浮標結構之擾動後振盪及傾角等變化(Kharif et al., 2009)。

其中，浮標之載台結構設之設計雖為穩定波浪使其傾角變化不至超過有限水深之Stokes之理論值，即波峰夾角120度，相對於浮標垂直傾角則為30度。但實際之極端事件作用下之波浪，浮標觀測之姿態並非呈現與水面垂直之條件下，觀測紀錄則需改正浮標的感測器座標(body frame)為相對於當地水平座標(world frame)的關係以此得到浮標體相對於水面之垂直運動特性。Bender等人(2010)於浮標傾角改正研究顯示，未改正之波高則為高估26%-56%。

本研究將以此浮標姿態改正以分析過去觀測資料中極值波高之連續水位及方向波譜變化特性。

## 二、浮標載體座標轉換

浮標體之感測器包含三軸加速度計與陀螺儀，並以感測器之相互垂直之三軸作為感測器座標(body frame)，示如圖1。且三軸各自對應之傾斜角度為俯仰角(Pitch,  $\beta$ )，滾角(Roll,  $\gamma$ )及偏擺角(Yaw,  $\alpha$ )，並稱為歐拉角(Euler angle)。各歐拉角之旋轉陣轉換則如下式(1)至(3)

$$R_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$R_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$R_x(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中， $R_z(\alpha)$ 為以垂直軸(Z)、 $R_y(\beta)$ 為以Y軸及 $R_x(\gamma)$ 為以X軸逆時鐘旋轉之變換矩陣。當載體處於任何傾角皆可由上述公式進行轉換成當地水平座標(world frame)，而該轉換公式稱為方向餘弦矩陣(Direction Cosine Matrix)示如下式

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = R_z(\alpha)R_y(\beta)R_x(\gamma) = \begin{pmatrix} \alpha_c\beta_c & \alpha_c\beta_s\gamma_s - \alpha_s\gamma_c & \alpha_c\beta_s\gamma_c + \alpha_s\gamma_s \\ \alpha_s\beta_c & \alpha_s\beta_s\gamma_s + \alpha_c\gamma_c & \alpha_s\beta_s\gamma_c - \alpha_c\gamma_s \\ -\beta_s & \beta_c\gamma_s & \beta_c\gamma_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中，方向餘弦矩陣之各行列值下標 $c$ 與 $s$ 為 $\cos$ 及 $\sin$ 運算子。因此由感測計紀錄之加速度值 $\mathbf{A}^b=(\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y, \mathbf{A}_z)^b$ 經由方向餘弦矩陣之轉換成以當地水平座標之加速度 $\mathbf{A}^w=(\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y, \mathbf{A}_z)^w$ ，轉換關係式則為

$$\mathbf{A}^w = R(\alpha, \beta, \gamma)\mathbf{A}^b \quad (5)$$

另外，三軸各自對應之傾斜角度則可由三軸加速度求得，並如下式

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z}\right)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right) \quad (6)$$

由此可將浮標載體於任意時間所處之感測器座標，並由方向餘弦矩陣轉換至當地水平座標系統，藉此修正垂直軸之加速度以分析改正前後波高與波向特性。

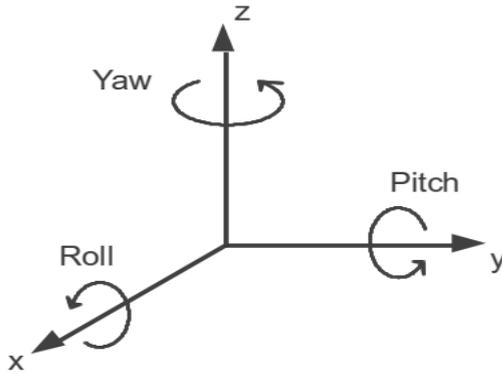


圖 1 浮標座標系統及其傾斜角

### 三、資料分析

本研究以中央氣象局及經濟部水利署所屬之花蓮、蘇澳及龍洞波浪浮標之觀測資料(包含三軸加速度、傾斜角及方位角)作為傾角座標改正之分析，且各浮標所處水深依序為21、20及30公尺。除蘇澳浮標離岸約4公里外，其他兩浮標約離岸1公里。

本研究並應用WAFO (Wave Analysis for Fatigue and Oceanography) Matlab工具進行方向波譜的分析與計算，波譜之計算則以最大熵法(maximum entropy method)推估其方向(波向定義為波浪傳遞至觀測儀器之方向)。並根據NDBC浮標觀測及計算手冊(NDBC Technical Document 96-01)進行波高加速度之位移轉換，且低頻之截斷頻率為0.03Hz。

圖2為2015年蘇迪勒颱風蘇澳浮標斷纜前未經改正之轉換水位資料及水平XY向量之傾角變化，其中原始數據之傾角截斷傾角超過30度之值並使其保持於30度，經式(6)之三軸加速度恢復XY向量之傾角變化將可得到當時浮標轉換成當地水平座標系統之姿態如圖3。

圖2中截斷傾角超過30度則對應波浪振幅超過40公尺之水位變化，顯示浮標觀測該極值波浪時期浮標姿態之傾角已不可忽略，而須進行改正。且蘇澳浮標之佈放水深約為20公尺，亦顯示該最大波高與水深比值超過理論臨界碎波條件(0.55)。

圖3為傾角改正之水位變化，顯示其水位振幅之改正量約仍超過20公尺(約50%改正量)，但改正後最大波高與水深比值則接近0.55。

圖5及圖6為龍洞福浮標之水位傾角改正分析。最大振幅約為38公尺，最大波高與水深比值亦大於0.55，其水位振幅改正量則約為47%，改正後之水位則較符合理論臨界碎波條件。

圖4及圖7為上述蘇澳與龍洞於蘇迪勒颱風時期方向波譜與傾角改正後之方向波譜分析。圖4為該時刻之蘇澳浮標方向波譜，改正前後之主要波向約為東向。然而改正後之波譜頻率範圍較改正前寬，修正前只有一個顯著主頻，修正後則有兩個主頻。該傾角改正修正水位振幅適當降低低頻效應。圖7則顯示龍洞之方向波譜分析結果，改正前後波向由東向變成東南向，改正後之頻譜亦因降低低頻效應而範圍變寬。

除了颱風期間所觀測之極值波高，圖8為花蓮浮標所觀測之異常浪，其中為改正前之最大波高(16.35公尺)大於示性波高(5.88公尺)之兩倍以上(董等人2013)然而發生最大高時刻，其傾角變化具垂直軸約為60度，且水位振幅改正量約為50%。雖然經過傾角修正可將降低異常水位振幅，但是仍須探究該時刻浮標載體為何處在約60傾角的姿態，發生該異常之傾角前後水位變化並無異常增幅。

由此可知當觀測資料處於極端條件下(如颱風或異常波時)，浮標載體的傾角是需要分析波浪統計前進行改正。且原始資料於淺水波理論之假設下，截斷超過30度之水平傾角(俯仰角及滾角)，該條件無法判斷浮標體所處之姿態，因此該品管門閥條件則需更合理討論。

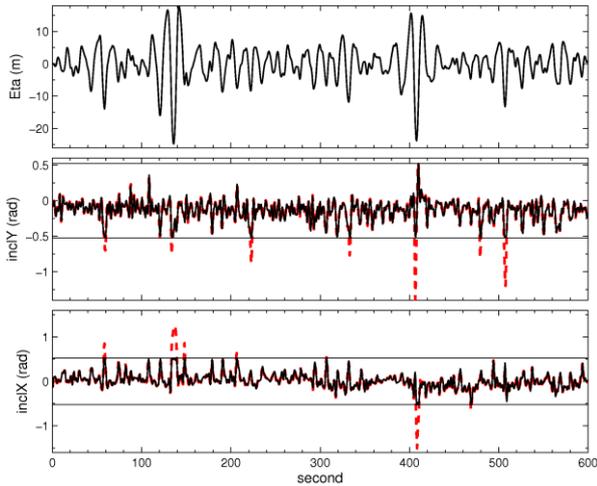


圖 2 蘇澳浮標於2015/08/08 01:00之觀測數據。上圖未經傾角校正之水位、兩下圖為沿X及Y方向之傾角，黑實線為原始資料，且截斷傾角超過30度。紅虛線則為恢復之傾角值，橫線顯示為徑度 $\pi/6$ 。

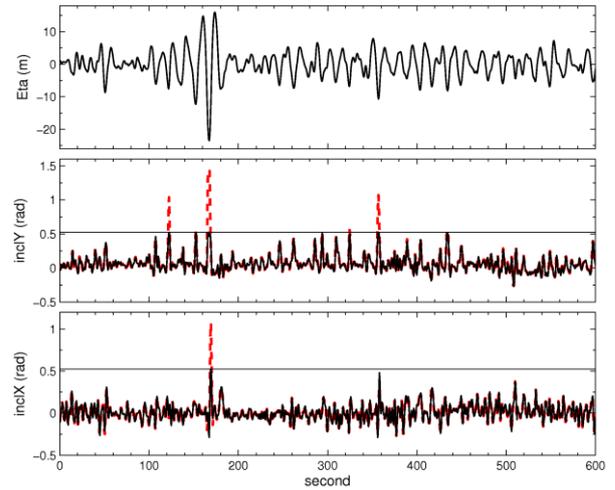


圖 5 龍洞浮標於2015/08/08 05:00之觀測數據。上圖未經傾角校正之水位、兩下圖為沿X及Y方向之傾角，黑實線為原始資料，且截斷傾角超過30度。紅虛線則為恢復之傾角值，橫線顯示為徑度 $\pi/6$ 。

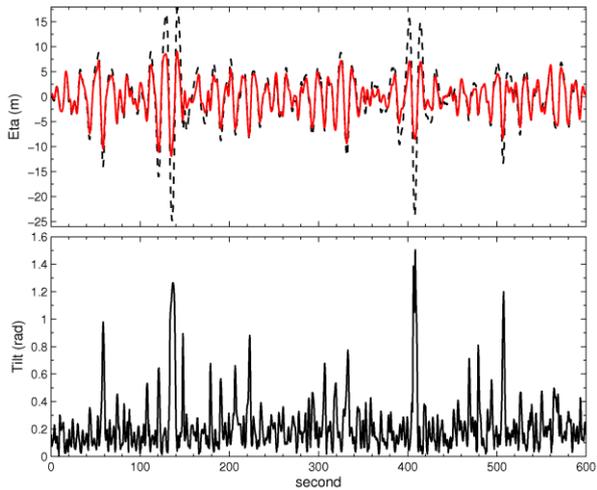


圖3 為圖2之傾角改正水位轉換，上圖紅實線為改正後資料，黑虛線則為未改正資料。下圖為垂直軸之傾角變化

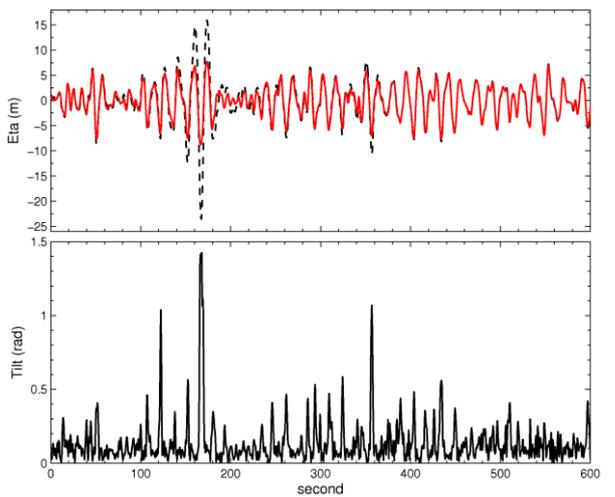


圖6 為圖4之傾角改正水位轉換，上圖紅實線為改正後資料，黑虛線則為未改正資料。下圖為垂直軸之傾角變化

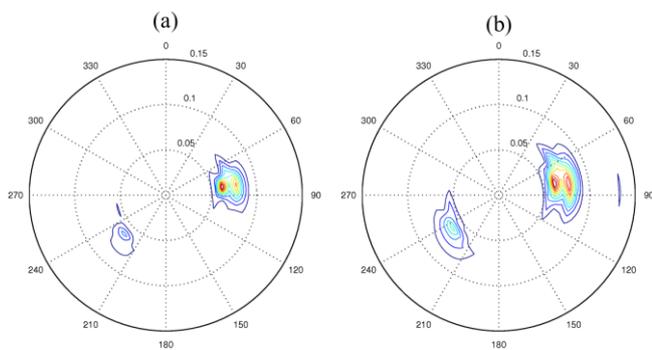


圖4 (a)蘇澳浮標於2015/08/08 01:00之方向波譜及(b)傾角改正後之方向波譜

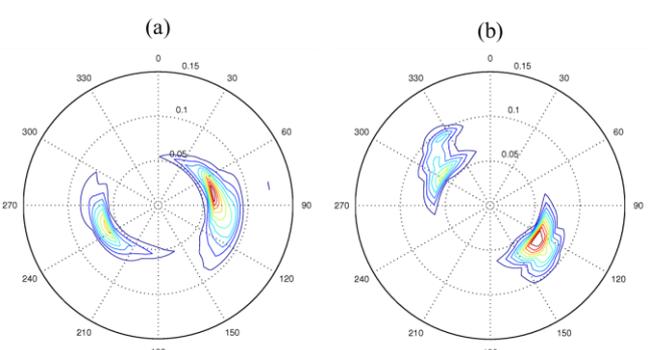


圖7 (a)龍洞浮標於2015/08/08 05:00之方向波譜及(b)傾角改正後之方向波譜

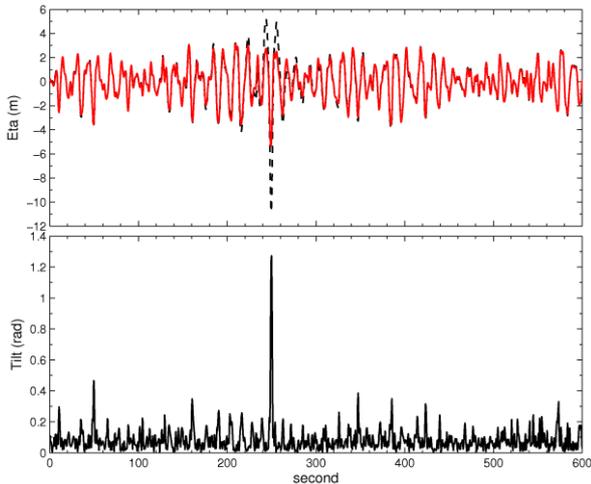


圖 8 花蓮浮標於2010/10/28 22:00之觀測數據。上圖未經傾角校正之水位、兩下圖為沿X及Y方向之傾角，黑實線為原始資料，且截斷傾角超過30度。紅虛線則為恢復之傾角值，橫線顯示為徑度 $\pi/6$ 。

另將2015年蘇迪勒颱風於蘇澳與龍洞浮標之觀測紀錄經傾角改正後計算其波高值，示如圖9及10。其中蘇澳及龍洞浮標觀測到示性波高約為17公尺後，兩者即發生斷纜的情況。颱風波浪於8月7日下午開始增強，波浪亦增強超過5公尺，浮標姿態即受波浪作用使得傾角增大。並且可看出經傾角修正後蘇澳之波高約為14公尺，龍洞則約為12公尺。蘇澳浮標於颱風期間的最大修正量為3公尺，龍洞浮標則為5公尺。

由上述改正結果，顯示當浮標載體受極值波高作用下，傾角修正需適當考慮於水位資料之分析。以降低波高振幅的變化並以此減低低頻之效應而改變方向波譜的方向變化特性。

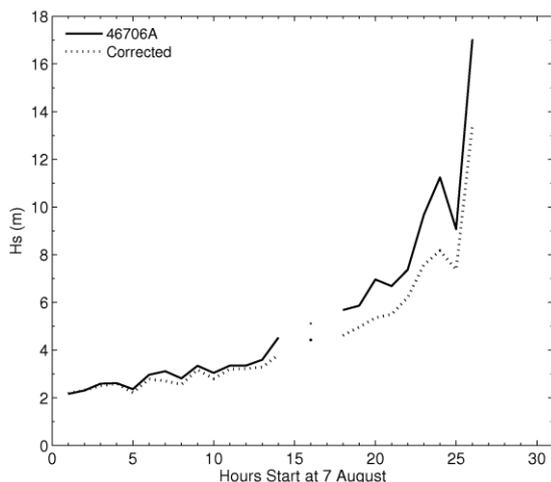


圖 9 蘇澳浮標於2015年蘇迪勒颱風觀測示性波高(實線)及經傾角修正後之示性波高(虛線)

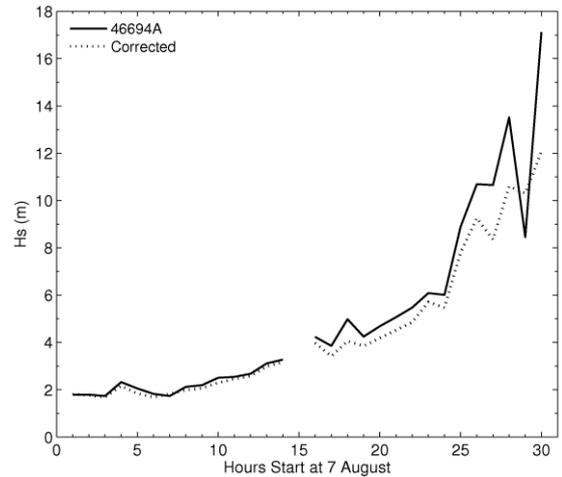


圖 10 龍洞浮標於2015年蘇迪勒颱風觀測示性波高(實線)及經傾角修正後之示性波高(虛線)

#### 四、結論

由於波浪浮標是由加速度計進行水位變化的觀測，可能會受到內部慣性矩所產生之低頻能量、資料校正、人為誤差、電子干擾、浮標結構之擾動後振盪及傾角等影響其加速度轉換水位的過程。其中浮標體的姿態改正並沒有考慮在現有的資料分析與品管中，且原始觀測之水平XY向量之傾角(俯仰角及滾角)因其品管門檻自動截斷傾角超過有限水深之Stokes之理論值。

因此傾角改正之分析結果指出，於颱風期間可改正水位振幅約20至50%，並因水位振幅之改正以降低低頻的效應。另外對於異常波浪的分析亦可反應因姿態改正後之實際水位變化。除此之外，亦須考慮異常波發生與傾角變化間的因果關係(如花蓮浮標異常波)。

本研究建議目前的資料品管中須考量傾角改正，且可考量由九個自由度(含三軸之加速度、角速度及磁力儀)之慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)進行更精確的浮標姿態觀測以釐清因載體座標轉換變化所導致的水位改正。並建議如海岸資料資訊計畫(The Coastal Data Information Program, CDIP)網站將資料分析及品管過程之資料公開以增進社會大眾對資料的使用與科學的應用。

#### 謝誌

本研究相關數據由中央氣象局滕春慈主任提供，使本研究得以順利完成，謹誌謝忱。經費則由國立成功大學頂尖計畫與科技部計畫: MOST103-2221-E006-115-MY3計畫支持。

## 參考文獻

1. Bender, LC, Guinasso NL, Walpert JN and Howden SD (2010) A comparison of methods for determining significant wave heights– applied to a 3 m discus buoy during Hurricane Katrina. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 27(6), 1012–1028.
2. Kharif, C., E. Pelinovsky and A. Slunyaev (2009) Rogue Waves in the Ocean, *Advances in Geophysical and Environmental Mechanics and Mathematics*, DOI 10.1007/978-3-540-88419-4 2.
3. Liu, P. C., Chen, H. S., Doong, D.-J., Kao, C. C., and Hsu, Y.-J. G (2008), Monstrous ocean waves during typhoon Krosa, *Ann. Geophys.*, 26, 1327–1329.
4. Massel S. R. (1996) On the largest wave height in water of constant depth, *Ocean Eng.*, 23, 553-573.
5. 董東環、蔡正翰、蔡仁智 (2013)，災害性瞬變海象之研究(2/4)，交通部中央氣象局。