

# 白浜砕波面の三次元形状観測に向けた研究

Development of three-dimensional wavefront observation method

北海道大学工学部 ○学生員 粕谷有汰 (Uta Kasuya)  
 北海道大学工学研究院 正会員 猿渡亜由未 (Ayumi Saruwatari)  
 北海道大学工学研究院 正会員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

## 1. はじめに

3次元表面波を正確に観測することは多面的な役割を担っている。例えば、表面波の方向性、波高、表面傾斜は、沖合や沿岸の構造物設計に重要であるばかりでなく、空気と水の境界における運動量、質量、熱伝導を理解できる。伝統的に、ブイ式や水圧式の波高計が表層水の変動を測定するために用いられてきた。しかしこの方法は、点計測であり、面的な情報の収集には制約がある。またセンサーが流れ場に侵入することで、表面波の運動を乱す可能性がある。そのため、ステレオ画像を用いることで非接触での測定方法の開発が行われてきた。白波被覆率を画像から読み取る方法では、2次元的な大気-海洋間のやり取りを測定することは可能だが、白波は実際には高さのある3次元形状をしているため、このやり方では正確なやり取りを把握することはできない。そこで近年では、複数のカメラを用いて波面を三次元的に観測する方法の開発が行われている<sup>1)</sup>。我々は、紋別港で現地観測を行うことで、より精密で広い範囲において、ステレオ画像から3D再構成技術の開発を目指す。本稿では、紋別港での現地観測の概要、複数台のカメラによる3次元水面計測の方法、撮影したステレオ画像に対するキャリブレーションの結果について記している。

## 2. 紋別での現地観測の概要

北海道北東部の紋別市沿岸部にある、氷海展望塔オホーツクタワー屋上部分に2台のカメラを設置した。紋別沖は、日本海からオホーツク海へと抜ける爆弾低気圧とその停滞の影響により、冬に暴風波浪が発達しやすいサイトである、設置したカメラは耐塩性で耐久性の高いAigilon MUXIMUS MMXである。画像解像度は1800×3200ピクセルである。カメラの重量が6.5kgと重いので安定した撮影を行うために、単管パイプにて土台を作成し、タワー屋上手すり部に固定を行った。カメラの位置の平均海面からの高さは30.6m、2台のカメラの間隔は3mで、左カメラ、右カメラとも西北西方向の海面を写すように調整した。15分ごとに1fpsで16枚の画像をそれぞれ撮影する。カメラの撮影条件設定は(表1)に示す通りである。観測期間は2022/9/29からであり2022年12月現在稼働中である。

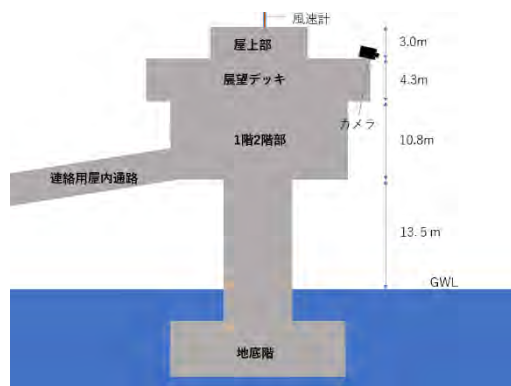


写真1 (上段右) 紋別市とオホーツクタワーの地図 (紋別市HPより)

写真2 (上段左) オホーツクタワー (オホーツク・ガリンコタワー株式会社HPより)

写真3 (中段) カメラと土台 (単管パイプで組み立てられているものが今回設置したもの)

図1 (下段) オホーツクタワーの鉛直概図

表1 カメラの撮影条件

Flicker Control	50Hz
Exposure	Automatic
Maximum Exposure	1/100s
Priority	Exposure
Enable Wide Dynamic Range	Check
Bracklight Compensation	0
Maximum Gain	6dB
Iris	Open
Preset: Custom	
Saturation	50
Sharpness	50
Brightness	50
White Balance: Custom	
Red	50
Blue	50
Temporal Filter Strength	50
Compression and Imge Rate	
Max Quality	1(Highest)

3. 3次元水面観測法

3.1 画像座標から実座標への平面変換

$$i' = \frac{a1i+b1j+c1}{a0i+b0j+c0} \dots (1)$$

$$j' = \frac{a2i+b2j+c2}{a0i+b0j+c0} \dots (2)$$

$$X = i' \cos\theta - j' \sin\theta \dots (3)$$

$$Y = i' \sin\theta + j' \cos\theta \dots (4)$$

(1)から(4)式により、左右両方のカメラそれぞれについて、撮像点のあるイメージ座標から二次元の実座標への変換を行った。(i,j)は画像座標、(X,Y)は実座標、a,b,cはそれぞれ係数を表す。その際に実座標のサイズを知る必要がある。そこで撮影された小型漁船のサイズに基づき(1)から(4)式の係数を決定した。

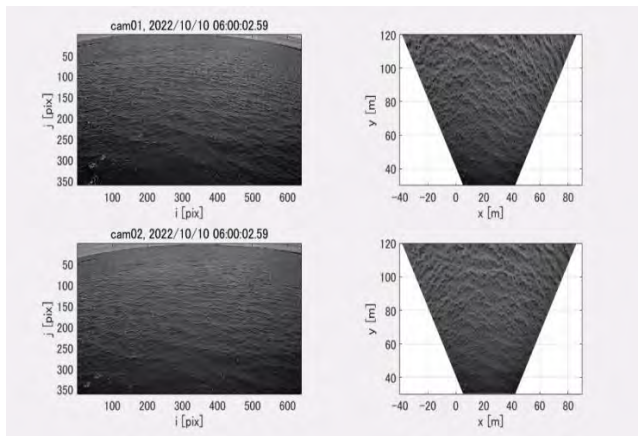


図3 実座標平面への変換  
 左上 左カメラの画像  
 左下 右カメラの画像  
 右上 左カメラ画像の平面実座標変換  
 右下 右カメラ画像の平面実座標変換

3.2 左右の画像相関

左右のカメラで撮影した画像を同じ物体点を撮影している点ごとに相関付けを行う。まず、1800×3200ピクセルの左カメラの画像に対して、40×60ピクセルのサブイメージを用意する。そのサブイメージと最も相関の高いサブイメージを右カメラの画像から見つけ出す。それを左画像について、上下左右順番に60ピクセルずつ動かしていき、14×50のポイントにおいて相関付けを行った。この作業を行う際に、画像の上半分については、カメラから対象までの距離が遠く、正確な測定が行えないため除外した。また、画像の左右100ピクセルずつに関しても左右のカメラの視界が異なるため同様に除外した。図5に示すように矢印の始点が左画像、終点がそれに対応する右画像である。ノイズをなくすため、周りに比べ極端にサブイメージの移動量又は移動方向が異なるものはエラーとして除去している。

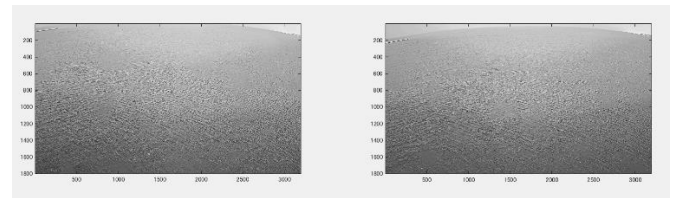


図4 相関を取る際に使用した画像。左が左カメラ、右が右カメラ。時刻は12/11 12:00

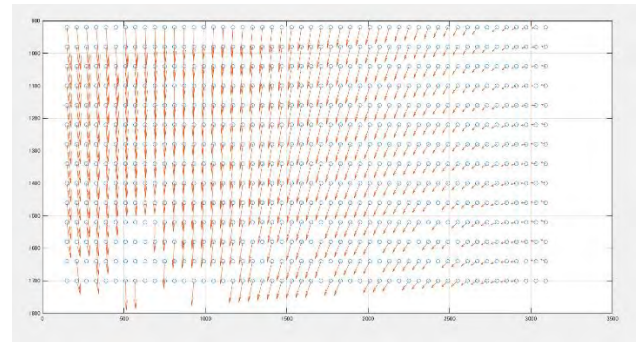


図5 12/11/1200での相関

4. 3次元座標へのキャリブレーションの結果

カメラの撮像点(i,j)と3次元空間内の物体点(X<sub>0</sub>,Y<sub>0</sub>,Z<sub>0</sub>)を結ぶ直線は、直接線形変換(DLT)式<sup>2)</sup>(1)式で表せる。

$$iL = \frac{a1X_0+a2Y_0+a3Z_0+a4}{a9X_0+a10Y_0+a11Z_0+1}, \quad jL = \frac{a5X_0+a6Y_0+a7Z_0+a8}{a9X_0+a10Y_0+a11Z_0+1}$$

$$iR = \frac{b1X_0+b2Y_0+b3Z_0+b4}{b9X_0+b10Y_0+b11Z_0+1}, \quad jR = \frac{b5X_0+b6Y_0+b7Z_0+b8}{b9X_0+b10Y_0+b11Z_0+1}$$

…(5)

(i,j)の添え字 L,R は左カメラと右カメラを表している。a=1,2,3,⋯,11, b=1,2,3,⋯,11の11個の係数はカメラのパラメータであり、DLT方程式はこのカメラパラメータが既知である限り、3次元の空間座標から2次元の画像平面座標への幾何学的変換を可能にする。

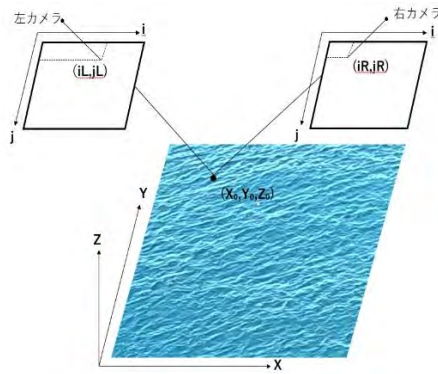


図2 二眼式立体視モデルの模式図

係数(a,b)と、左右の画像から与えられる (iL,jL,iR,jR) を(5)式の変形から得られた(6)式に代入することで、最小二乗法により実空間座標上の点である (X,Y,Z) を求めることができる。

$$\begin{bmatrix} a1 - a9 * iL & a2 - a10 * iL & a3 - a11 * iL \\ a5 - a9 * jL & a6 - a10 * jL & a7 - a11 * jL \\ b1 - b9 * iR & b2 - b10 * iR & b3 - b11 * iR \\ b5 - b9 * jR & b6 - b10 * jR & b7 - b11 * jR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} iL - a4 \\ jL - a8 \\ iR - b4 \\ jR - b8 \end{bmatrix} \dots(6)$$

3.1, 3.2 より、ある時刻における左右のカメラ画像と実座標平面における関連付けを行い (iL,jL,iR,jR,X,Y,Z) を取得した。(1)式を用いることにより、一つの画像上の 14×50 の点からノイズによって除去した点を除いたものにおいて、各点が4本の方程式を得ることができる。Zに関しては対象時刻における潮位を気象庁 HP<sup>3)</sup>の紋別市の潮位より採用した。2022/11/19 08:00, 2022/11/20 12:00, 2022/11/22 12:00, 2022/12/09 14:30, 2022/12/10 10:00, 2022/12/11/12:00, の計6時刻に対して (iL,jL,iR,jR,X,Y,Z) を取得した。Zに潮位を用いるため比較的波が穏やかで、Zの値に幅の出るような時刻を選定した。これらの画像上の点における4本の方程式をそれぞれ解くことでその点における22個の係数を求めることができ、そこから最小二乗法により最適な係数を決定した。

2022/11/19 08:00の画像に対して三次元座標への変形を行った。得られた画像から、極めて狭い範囲であるが、波面の形状に近いものを確認することが出来た。

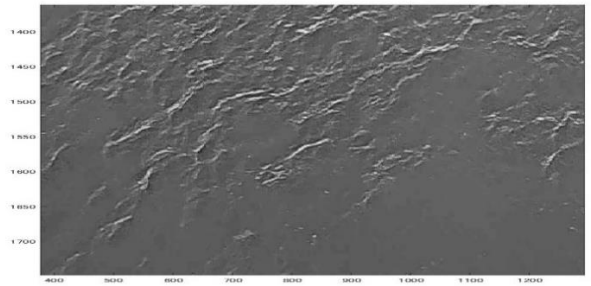


図6 2022/11/19 08:00の対象範囲の海面

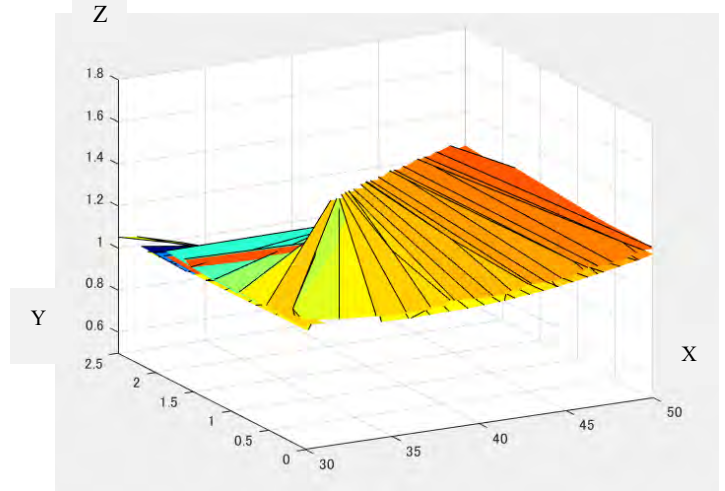


図7 求めた三次元図

5. まとめ

今回得られた3次元図はカメラにより観測された画像の一部なので、もっと広い範囲で測定できるようにしていきたい。また、この時刻の潮位は実際には0.62mであり、求めた値とは異なっているため見直しが必要である。より正確な観測法の確立のための改善点をいかに記す。一つ目は、計算した時刻が6時刻のみで潮位も6種類しかないので観測時刻を増やし、より多くのデータの蓄積を行う必要がある。二つ目は、相関関係の際のノイズをなくすためノイズ除去の適切な閾値を決めたい。三つ目は、実座標平面へのキャリブレーションの際に画像に映り込んだ船を使用したのが正確なサイズはわからず、かつ当時は画素が荒かったため、正確な校正が行えなかった可能性がある。四つ目は、カメラ台は強風で吹き飛ばないように固定を行ったが鳥などの少しの接触で位置がずれてしまうので固定する方法を考える必要がある。

5 参考文献

- 1) Automated trinocular stereo imaging system for three-dimensional surface wave measurements  
Justin M.Wanek, Chin H.Wu 2006
- 2) Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry  
Abdel-Aziz and Karara,1971)

## 3) 気象庁 HP 紋別潮位データ