

船舶姿勢を考慮した画像処理による 海洋波の方位・速度計測に関する研究

米澤 俊昭*、坂田 龍一**

Study on Measurement of Speed and Direction of Sea Waves by Image Processing in Consideration of Ship's Attitude

Toshiaki YONEZAWA *, Ryuichi SAKATA **

Abstract : When one drives the ship near quay, direction and speed of sea waves has been measured with eyes. Therefore the measurement is less-accurate. Thus its improvement has been hoped. So the study proposes a measurement system of direction and speed of sea waves using camera images as part of ship handling support system. This system films the state of sea surface with video cameras, and imports different frame imageries at each unit time (frame). Then this system measures direction and speed of sea waves by calculating correlation coefficient between measurement window of each image after appropriate processing. It is confirmed that this system measures direction and speed of sea waves with high accuracy. Also it is confirmed that this system measures even with camera mounted on the ship affected by the rolling.

Key words : sea wave, image processing, speed, direction, ship's attitude

1. 緒言

日本は島国であるため、古くから船舶を利用した産業が盛んである。外国との貿易や交通の便として飛行機というライバルも現れたが、船の利点として物資の大量運搬などがあり、船舶事業が廃れることは当分ない。しかし、船舶事業が盛んな現在においても、船舶は数々の海難事故を起こしている。海上保安庁の平成 20 年度資料^[1]によると、海難船舶隻数は 2,414 隻、船舶事故による死亡・行方不明者数は 124 人となっている。また、海難全体で、人為的要因を原因とするものは約 7 割も占めている。平成 12 年～平成 20 年の過去 9 年間で見ると海難船舶隻数は減少傾向にあるが、まだまだ多発しているのが現状である。

この原因の一つとして船舶を操船する際、人が波の方位、速度を目視計測する際のミスが考えられる。日本を含め、海

に面する各国でも同様の状況下に置かれており、現在も改善が望まれている。前述したように、船舶事業は重要であり、その船舶の操船を支援するための海洋波の方位、速度の計測システムも必要になってくると考えられる。

これまで、波の速度、方位を計測する方法として、プロペラなどを用いてその回転数から速度を、流れに追従するベーンの向きから方位を計測する流速計があるが、沿岸域などでは生物付着によるプロペラなど可動部の性能低下が問題となる。また、音波を利用して速度、方位を計測する ADCP (ドップラー流速計) は可動部がなく、生物付着による劣化が起りにくい、音波を海中に発射する送信器は比較的大きな電力を必要とし、音源が長期間安定して送信し続けるための電源確保が課題となる。さらに、微弱な散乱音波からドップラーシフト量を計測するため、高度な信号検出、信号処理技術が必要である^{[2][3]}。

そこで、本研究では操船支援システムの一環として、カメラ画像を利用した波浪計測システムを提案する。具体的には、ビデオカメラにより海面の状況を撮影して、単位時間 (フレーム) ごとに異なるフレーム画像を取り込み、適切な処理を行った後に各画像に設定した計測ウインドウ間の相関係数

(2010 年 11 月 30 日受理)

*宇部工業高等専門学校制御情報工学科

** (株)常盤商会

(平成 22 年 3 月生産システム工学専攻修了)

を計算することにより、海洋波の方位および速度を求める基本的な手法について提案した。さらに、本手法を応用して船体上にカメラを設置して、船舶姿勢（ここではローリング）の変化について考慮した海洋波の方位・速度計測についても検討を行った。

2. 岸壁設置カメラによる方位・速度計測

2.1 画像変換

本システムのカメラ配置を図 1 に示す。ここで、岸壁に置いたカメラから海面までの高さを H [m]、俯角を α [°] とする。本計測方式では、図 1 のように俯角が生じるため、画像を真上から撮影された画像に変換する必要がある。そこで、本システムでは、座標系を図 2 のように、カメラの視点を原点 O_c として、視線を Z_c 軸とする $O_c - X_c Y_c Z_c$ 座標系、カメラの視線と水面の交点を原点 O として、海面からの深さを Z 軸とする $O - XYZ$ 座標系ならびに画面とカメラの視線の交点を原点 O_s とする座標系 $O_s - UV$ の三つを考える。この $O - XYZ$ 座標系と $O_s - UV$ 座標系の関係式を求めることで、地上から撮影された画像を真上から撮影された画像に変換することができる。この関係式を求めるため、 $O - XYZ$ 座標系と $O_c - X_c Y_c Z_c$ 座標系の関係式ならびに $O_c - X_c Y_c Z_c$ 座標系と $O_s - UV$ 座標系の関係式を考える。

まず、 $O - XYZ$ 座標系と $O_c - X_c Y_c Z_c$ 座標系の関係式は次式のようになる^[4]。

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ X_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\cos \alpha & \frac{H}{\sin \alpha} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

なお、海面を平面としているため、ここでは Z を無視している。また、 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 座標系と $O_s - UV$ 座標系の関係式はカメラから画面までの視線の距離を L [m] とすると次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{Z_c U}{L} \\ \frac{Z_c V}{L} \end{pmatrix} \quad (2)$$

したがって、(1)、(2)式より、 $O - XYZ$ 座標系と $O_s - UV$ 座標系の関係式は次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{HU}{L \sin \alpha + V \cos \alpha} \\ \frac{HV}{\sin \alpha (L \sin \alpha + V \cos \alpha)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

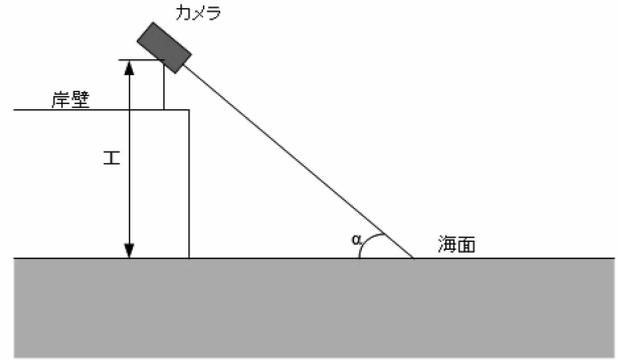


図 1 岸壁におけるカメラと海面の位置関係

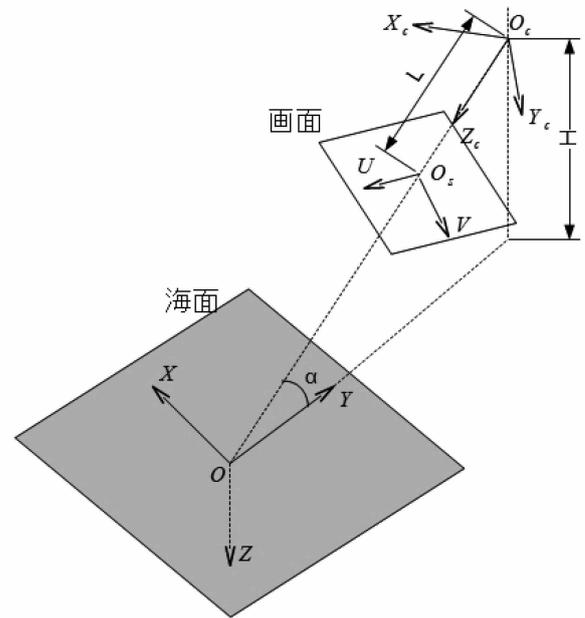


図 2 座標系とその位置関係

この(3)式を用いることで、俯角の生じた状態で撮影された画像を真上から撮影された画像に変換することができる。

2.2 計測方法

海洋波の方位、速度の計測方法としては、まず、基準となる画像の特徴を示す部分に対して計測ウインドウを設定する。そして、連続した複数画像間の濃度値（グレースケール値）を相関係数により比較することによって、海洋波の方位、速度を求める。

カメラから得られる連続する 2 画像にそれぞれ適当な計測ウインドウ A 、 B を設定すれば、これらの相関係数 $r(A, B)$ は

$$r(A, B) = \frac{\sum_{ij} a_{ij} b_{ij}}{\sqrt{\sum_{ij} (a_{ij})^2} \sqrt{\sum_{ij} (b_{ij})^2}} \quad (4)$$

で定義される^[5]。なお、 a_{ij} 、 b_{ij} はそれぞれ計測ウインドウ、 A 、 B の画素位置 (i, j) における画素の濃度値である。したがって、 $r(A, B)$ が1に近いほどこの二つの計測ウインドウは相関が強く、画像採取間に移動したものとみなすことができる。

次に、より精度を高くするために画像を3枚以上用いて計測を行う方式として、現時刻を k として、過去 N (ただし、 $N \geq 3$)フレームの画像を用いた相関係数の求め方を考える。この時、方位 θ および速度 V を与えると、時刻 k 、 $k-1$ 、 \dots 、 $k-(N-1)$ に対応するウインドウを求めることができる。したがって、時刻 l ($l = k-1, \dots, k-(N-1)$)のウインドウを W^l と定義し、その左上端座標を (x_l, y_l) とすると、その座標は、離散画像を用いるため、画像採取間隔 Δt を考慮して次のようになる。

$$x_l = x_k - V\Delta t \cdot (k-l) \cos \theta \quad (5)$$

$$y_l = y_k - V\Delta t \cdot (k-l) \sin \theta \quad (6)$$

$$(l = k-1, \dots, k-(N-1))$$

よって、方位 θ および速度 V に対して、過去 N フレームにおける平均相関係数を求めると、

$$\bar{r}(k, \theta, V) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N r_l \quad (7)$$

となる。ここで、 r_l は時刻 l のウインドウ W^l と時刻 $(l-1)$ のウインドウ W^{l-1} との相関係数を表し、次式で与えられる。

$$r_l = \frac{\sum_{ij} w_{ij}^l w_{ij}^{l-1}}{\sqrt{\sum_{ij} (w_{ij}^l)^2} \sqrt{\sum_{ij} (w_{ij}^{l-1})^2}} \quad (8)$$

なお、 w_{ij}^l 、 w_{ij}^{l-1} はそれぞれウインドウ W^l 、 W^{l-1} の画素位置 (i, j) における画素の濃度値である。したがって、(7)式を最大化する θ および V を求めれば、現時刻 k での海洋波の方位、速度を求めることができる。

2.3 実験

本提案手法を用いて実際の海洋波の方位・速度計測を試みた。本実験において使用した画像は宇部市市床波漁港内にて撮影した映像(図3)を利用した。これは録画した動画の0.2秒毎のフレーム画像から静止画像を得ている。ここでは 255×170 ピクセルの8ビットグレースケール画像を用いて0.6秒間(4フレーム)における方位・速度計測を行った。なお、本実験では $\alpha = 15^\circ$ 、 $H = 6$ [m]の条件で撮影した。また、図4のように計測ウインドウの開始位置を(75, 50)として、サイズを 110×44 [pixel]に設定した。変換した海面画像の



図3 海面画像の一例

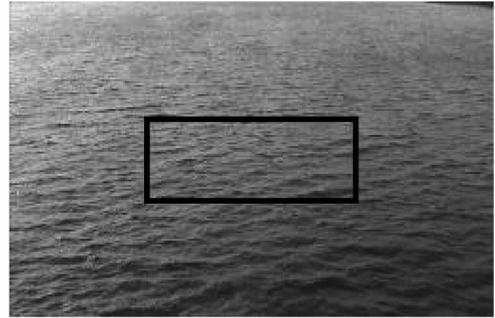


図4 計測ウインドウ

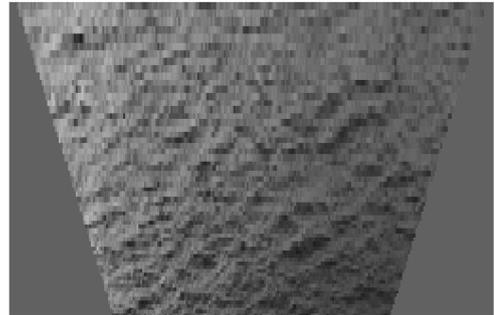


図5 変換した画像の一例

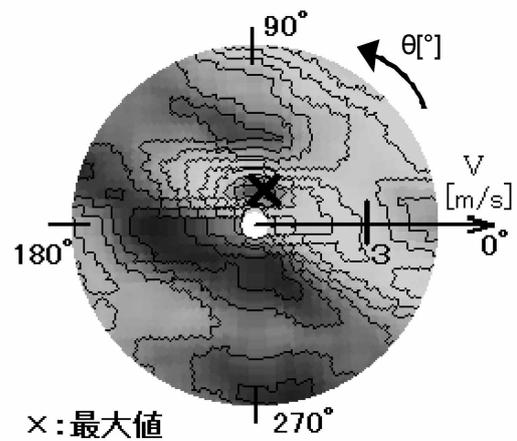


図6 相関係数の等高線図

一例を図5、相関係数の等高線図を図6に示す。なお、図6は半径を速度、角度を方位にとっており、円内の線は相関係

数の等高線、×印は相関係数の最大値を示している。

以上の条件で計測を行った結果、速度は 0.875[m/s]、方位は 74°]となった。この計測結果は、動画を目視で計測した値にほぼ一致しており、実際の海洋波に対して本手法が適用できることが示された。

3. 船舶設置カメラによる方位・速度計測

3.1 概要

前述したシステムをより汎用化するには船舶上にカメラを設置した場合を考える必要がある。しかし、船舶にカメラを設置する場合、船舶の揺れによる影響を考慮する必要がある。船舶の揺れには、図7のように主にローリング(横揺れ)、ピッチング(縦揺れ)、ヒービング(上下動)の三つがある。ここでは、その揺れの中で最も影響の大きいローリングについてのみ考慮した海洋波の方位、速度の計測方法を示す。

3.2 ローリングを考慮した画像の変換

本システムのカメラ配置を図8に示す。左図は船舶の側面図、右図は船舶の後方図を表す。ここで、海面からカメラまでの距離を H [m]、カメラの俯角を α [°]、カメラの傾斜角すなわちローリング角を ψ [°]とする。

第2章と同様に座標系を図9のようにした場合、 $O-XYZ$ 座標系と O_s-UV 座標系は海面を平面と仮定して、カメラから画面までの距離を L [m]とすると次式のような関係になる。

$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{LX \cos \psi}{\frac{H}{\sin \alpha} - X \sin \psi \sin \alpha - Y \cos \alpha} \\ \frac{L(Y \sin \alpha - X \sin \psi \cos \alpha)}{\frac{H}{\sin \alpha} - X \sin \psi \sin \alpha - Y \cos \alpha} \end{pmatrix} \quad (9)$$

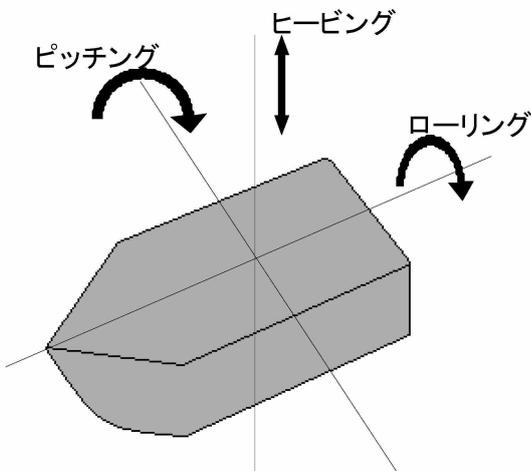


図7 船舶の揺れ

この(9)式を用いることで、俯角の生じた状態で撮影された画像を真上から撮影された画像に変換することができる。その変換画像を用い、2.と同様に海洋波の方位・速度を計測する。しかし、(9)式には未知数であるローリング角 ψ [°] が含まれているため、このままでは計測することができない。そこで、 ψ の計測方法について検討する必要がある。

3.3 ローリング角の計測

ローリングは二つの正弦波の一次結合であらわされることが知られている^[6]が、ここでは、より簡単のためにローリング角 ψ を次式のように定義する。

$$\psi(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi\right) \quad (10)$$

なお、 A [°]、 T [s]、 ϕ [rad]はそれぞれローリングの振幅、周期、位相であり、かつ未知である。したがって、海洋波の方位、速度を計測する際に、これらの未知パラメータを推定する必要があり、これを速度ベクトルのばらつきと相関係数を利用して行う。

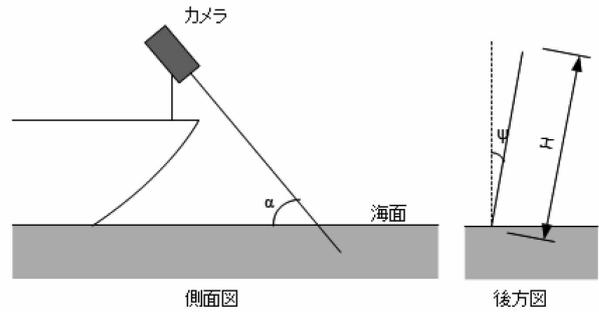


図8 船舶上のカメラと海面の位置関係

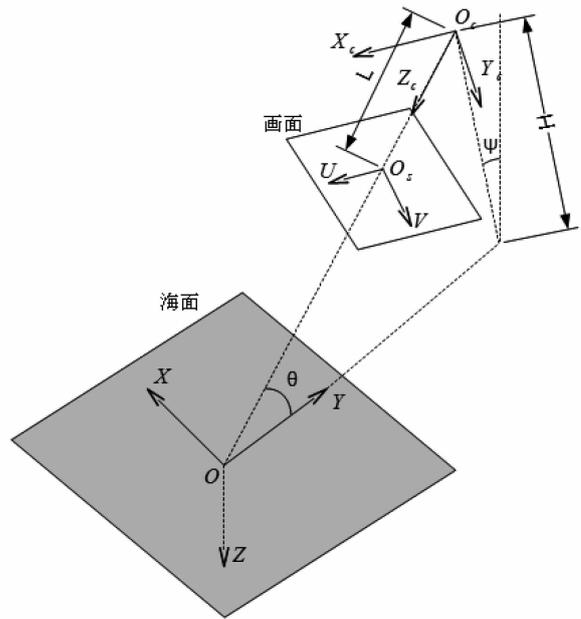


図9 ローリングを考慮した座標系

あらかじめ A 、 T 、 φ を与えて、(9)式を用いて変換した N 組の連続する 2 画像から方位、速度の計測を行えば、 N 個の方位および速度つまり速度ベクトルを得ることができる。これらの速度ベクトルのばらつき V_d は次式で与えられる。

$$V_d = \sum_{i=1}^N \sqrt{(\bar{V} \cos \bar{\theta} - V_i \cos \theta_i)^2 + (\bar{V} \sin \bar{\theta} - V_i \sin \theta_i)^2} \quad (11)$$

なお、 \bar{V} 、 $\bar{\theta}$ はそれぞれ平均速度ベクトルの速度と方位であり、 V_i 、 θ_i はそれぞれ i 回目の計測での速度ベクトルの速度と方位である。

海洋波の方位、速度が短時間では変化しないと考えると、 A 、 T 、 φ に適切な値を与えれば、求められる速度ベクトルは全てほぼ同じ値になる。つまり、 V_d は 0 に近い値になる。したがって、(11)式を最小化する A 、 T 、 φ を求めればよいことがわかる。

以上より、本方式では、 V_d を評価値として最小値となった際のパラメータを計測値とする。なお、 V_d が同値の場合、方位・速度計測の際に求めた相関係数が大なるパラメータを計測値として採用する。

3.4 シミュレーション

本提案手法の有効性を確認するためにシミュレーションを行った。本シミュレーションにおいて使用したモデルとその画像の一例を図 10、11 に示す。モデル (図 10) はあらかじめローリング角の振幅 A [°]、周期 T [s]、位相 φ [rad] と海洋波の方位 θ [°]、速度 V [m/s] を与えて、進行方向に対してほぼ垂直になるように線を引き、1 フレーム毎に与えた方位、速度で動かしたものである。使用した画像 (図 11) は作成したモデルを 0.2 秒毎のフレーム画像として座標変換したものである。

いずれも 255×170 ピクセルの 8 ビットグレースケール画像として、方位・速度計測を行った。いずれの場合も $\theta = 45$ [°]、 $H = 2.0$ [m] の条件で行い、計測ウインドウは基準ウインドウの開始位置を画像の中央とし、サイズは 110×44 ピクセルとした。また、未知パラメータはそれぞれ A を 0.2 [°] 毎に 0.0~3.0 [°] の範囲で、 T を 0.2 [s] 毎に 0.5~3.0 [s] の範囲で、 φ を $\pi/4$ [rad] 毎に 0~ 2π [rad] の範囲で探索を行った。本実験のシミュレーション条件と実験結果を表 1、表 2 に示す。表 2 の実験結果より、本計測方式でローリング角だけでなく、方位、速度も正確に計測できることがわかる。

4. 結言

本研究では、操船支援システムの一環として、ビデオカメラにより海面の状況を撮影し、単位時間 (フレーム) ごとに



図 10 モデルの一例



図 11 シミュレーション画像の一例

表 1 シミュレーション条件

実験番号	振幅 A [°]	周期 T [s]	位相 φ [rad]	速度 V [m/s]	方位 θ [°]
1	1.8	0.9	$\pi/2$	0.4	120
2	0.6	1.5	0	1.0	10
3	2.6	1.9	$3\pi/2$	1.1	260

表 2 実験結果

実験番号	振幅 A [°]	周期 T [s]	位相 φ [rad]	速度 V [m/s]	方位 θ [°]
1	1.8	0.9	$\pi/2$	0.41	120.3
2	0.6	1.5	0	0.99	10.3
3	2.6	1.9	$3\pi/2$	1.1	260.8

画像に設定した計測ウインドウ間の相関係数を計算することにより、海洋波の速度、方位を計測する方法を提案した。

まず岸壁に設置したカメラによる計測について示した。その方法として、海面を撮影した各画像を真上から撮影した画像に変換してから、海洋波の速度、方位を相関係数を用いて

計測を行った。また、評価のため実際の海洋波を撮影して実験を行った結果、目視によるものに近く、本手法で高精度な計測が可能であることがわかった。

さらに、船舶に設置したカメラによる計測について検討した。船舶は岸壁と違い、船舶の揺れを考慮しなければならなかったため、主な揺れのローリングの影響について考慮した。ここでは、速度ベクトルのばらつきと相関係数を利用してローリング角だけでなく海洋波の方位・速度の推定を行う方法を提案した。また、その手法の有効性を確認するため、シミュレーション実験を行った結果、本方式でローリング角ならびに海洋波の方位、速度の同時計測が可能であることが確認できた。

本報告ではローリングを単振動として計測を行ったが、今後は複雑なローリングモデルでも計測を行えるように、パラメータ推定の最適化手法を考えていく必要がある。

参考文献

- [1]海上保安庁,平成 20 年海難の現況と対策について 資料編, <http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h21/k20090331/k090331-siryuu.pdf>
- [2]海洋音響学会,海洋音響の基礎と応用,成山堂書店 (2004)
- [3]田口一夫・田畑雅洋,海洋計測工学概論,成山堂書店 (2005)
- [4]村上伸一,コンピュータグラフィックスの基礎,東京電機大学出版社 (2005)
- [5]前田良昭・木村一郎・押田至啓,計測工学,コロナ社 (2005)
- [6]米澤、田中,ローリング軸が未知な船舶に対する船舶姿勢計測,計測自動制御学会論文集, 36-11, 901/908 (2000)