

デジタルビデオカメラを用いた波面三次元計測に関する研究

Measurement of Wave Surface using Digital Video Camera

有田 守¹・出口一郎²

Mamoru ARITA, Ichiro DEGUCHI

It is important to grasp water surface profile when we discuss various phenomena in coastal zone. For example, sediment transport and rip current are determined mainly by the spatial distribution of waves in surf zone. Measurement of waves using Euler's method is a general. However it is difficult to determine spatial distribution of waves. A considerable number of studies have been conducted on the spatial wave distributions by using two video camera images. These studies analyzed azimuth difference of digital images taken by video cameras. In this study, the authors proposed the procedure to measure surface profile by applying stereo matching method of two images of the sea surface without any targets or tracers. The validity of the proposed procedure was examined through the experiment in a wave basin.

1. はじめに

海洋の波浪の計測, 実験室での波浪計測には, 圧力センサーや音波, 容量式の波浪計測機器が使われている。これらの計測装置は, 機器の設置された定点の波浪計測に有効な手段である。沿岸域, 特に砕波帯周辺での波浪分布, 実験室内での面的な波浪場の計測には, 従来の波浪計測装置を数多く配置することで面的な波浪特性を計測することとなる。しかし, これらの方法は多くの機器の設置に労力, コストがかかる。非接触の面的な波浪計測手法として, 波面を撮影した画像を用いて計測を行う手法が提案されている (例えば, 服部ら 1979)。

画像から三次元空間を計測する手法としてステレオ画像法が用いられる。この手法は, 二次元の画像から三角測量の原理を利用して三次元の座標を得るものである。ステレオ画像法を用いる場合, カメラパラメータの算定精度, 2 枚以上の画像から同一点を同定させる精度が 3 次元波面計測の精度に大きく影響する (例えば, 服部ら 1979; Stefan ら 2004)。

カメラパラメータの算定精度は, 使用するカメラにおいてレンズ歪みの少ない物, 画素数の多い物, レンズ歪みの影響を考慮したパラメータの算定法が提案されておりこれらを考慮することで精度の良い計測が行える (Stefan ら 2004)。

カメラによって撮影した波面の画像は, ほとんど同じ位置に設置された 2 台のカメラで撮影された場合であっても水面の光の反射によって異なる映像となり画像中の同一点の同定が困難になることが指摘されている。Justin ら 2005 は, 波面の反射により画像の同定が困難にな

ることを克服するために 3 台のカメラを用いて波面を撮影し精度の高い画像による波面計測を行っている。また, 畑中ら (2004) は画像解析による波面計測において PIV の手法を用いて波面にトレーサを散布しトレーサを撮影した画像の解析を試みることで水面の画像から同一点を容易に抽出する試みを行っている。筆者ら (2006) は, デジタルカメラを用いて波面の 3 次元計測を試みており静止画像の解析において精度の高い解析を行っている。

本報では, ハイビジョンデジタルビデオカメラを用いて波面を撮影し, ステレオ画像法によって 3 次元波面解析を行い計測精度について検討を行う。

2. ステレオ画像法

(1) 3 次元計測の原理

3 次元計測の原理は, 一般によく用いられるピンホールカメラに基づいた透視変換モデルにより実空間座標を計測している (井口ら 2002; 可視化情報学会編 2002)。図-1 に座標モデルを示す。一般に市販のされているカメラなどでは, レンズの歪みによって画像の中心から外側に向かうにつれて直線が湾曲して撮影される現象がおこる。レンズ歪みの影響は, 3 次元計測を行う際に画像の中心から離れた場所で計測精度に大きく影響することが知られている。しかし, 本報ではカメラパラメータを算定し, 既知点を逆算する際に十分な精度でカメラパラメータを算定できることを確認したため, レンズ歪みを用いない手法を採用した。

本研究で用いる三次元画像計測手法は, まず異なる 2 つの画像から, カメラの位置, 俯角, 画角によって定まるカメラパラメータを求め, その求められたカメラパラメータと 2 つの画像の同一点の画素の位置から実座標を算出するものである。

1 正会員 博(工) 大阪大学大学院工学研究科 助教
2 正会員 工博 大阪大学大学院工学研究科 教授

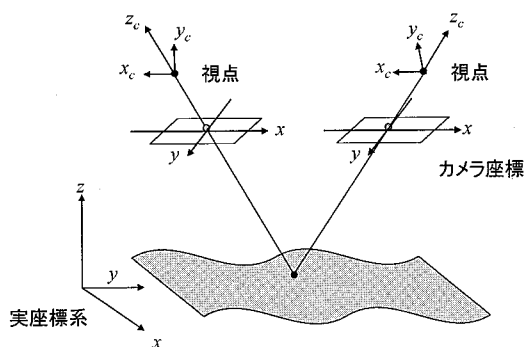


図-1 3次元画像計測の原理

式(1)、(2)にカメラ座標と実空間座標の関係を示す。カメラ座標は X_p, Y_p は実空間座標 x_p, y_p, z_p とカメラパラメータを用いて変換できる。

$$X_p = -c \frac{a_{11}(x_p - x_0) + a_{12}(y_p - y_0) + a_{13}(z_p - z_0)}{a_{31}(x_p - x_0) + a_{32}(y_p - y_0) + a_{33}(z_p - z_0)} \quad (1)$$

$$Y_p = -c \frac{a_{21}(x_p - x_0) + a_{22}(y_p - y_0) + a_{23}(z_p - z_0)}{a_{31}(x_p - x_0) + a_{32}(y_p - y_0) + a_{33}(z_p - z_0)} \quad (2)$$

ここで、 x_p, y_p, z_p は、実空間における3次元座標、 x_0, y_0, z_0 は実空間におけるレンズの中心位置、 $a_{11} \sim a_{33}$ は ω, ϕ, κ により表される x_0, y_0, z_0 周りの回転角である。ここで、 ω, ϕ, κ は、画像が水平状態からどのような角度で撮影されたかを表す回転角、 c はカメラのレンズ焦点距離である。

本報では、2台のカメラを用いて3次元計測を行うためカメラパラメータはカメラごとに得られる。カメラパラメータは、基準点と呼ばれる実座標が既知であるターゲットを撮影し、画像からカメラ座標を読み取ることで得ることができる。一般に基準点は6点以上必要で数が多いほどカメラパラメータの精度が良いとされているが、本研究では12点の基準点を最低でも確保するように計測を行った。

カメラパラメータを算定した後に、波面をカメラによって撮影する。撮影された画像のペアから同一点を解析し、既知であるカメラパラメータと解析によって得られたカメラ座標を式(1)、(2)より実空間座標を算定する。

(2) 同一点の算定手法

2台のカメラから同一点を解析する手法は、輝度値を用いて直接相互相関法やクロススペクトル法によって算定する手法がある。本報では直接相互相関法によって2枚の画像より同一点を算定する手法を採用した。

撮影された2枚の画像の輝度値分布を2次元信号 $f(X, Y)$ と $g(X + \Delta X, Y + \Delta Y)$ との相互相関関数を計算すればよく相互相関関数 $C_{fg}(\Delta X, \Delta Y)$ は離散表

現の定義式で相関関数を計算することになる。検査領域サイズを $N \times N$ pixel とすると、相互相関関数は式(3)の通りである。

$$C_{fg}(\Delta X, \Delta Y) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(X_i, Y_j) - f_m\} \{g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y) - g_m\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(X_i, Y_j) - f_m\}^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y) - g_m\}^2}} \quad (3)$$

3. 3次元計測装置

(1) 計測装置

3次元計測装置は、民生用ハイビジョンカメラ SONY SDR (動画撮影時 143 万画素) を使用した。2台のカメラの同期をとるために研究室創遊社製の LANC コントローラによって撮影開始時の信号を2台のカメラに送信することにより録画開始時の同期をとる工夫をしている。民生用カメラではカメラの個体差によって録画の起動時間が異なる場合があるが、本装置では個体差によって生じる起動ラグが十分に小さいと考えカメラの制御のみで2台の同期をとることにした。カメラで録画した動画は、CANOPUS 社製の EDIUS Pro 4.0 によって AVI 形式の画像に変換し 30 fps で BMP 形式の画像に変換し解析画像を取得する。

写真-1 に計測装置の写真を示す。2台のカメラは SLIK 株式会社製の PLATE II 雲台にカメラを取り付け雲台を三脚に固定している。

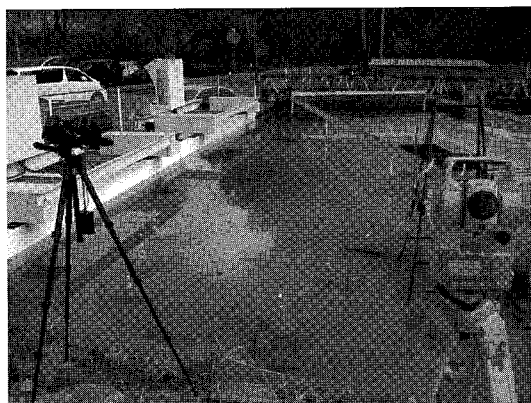


写真-1 3次元計測装置

(2) カメラの設置位置と精度に関する考察

ステレオ画像法を用いて3次元計測を行う場合カメラの画素数、対象物の範囲、設置するカメラの位置、角度等が大きく影響すると考えられる。たとえば、高さ方向の精度を上げようとするカメラは対象物を正面から撮影する位置に設置しなければならない。その結果、奥行き方向の精度はカメラの角度によって単位 pixel あたり

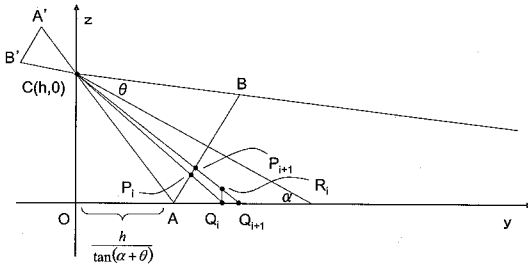


図-2 カメラと対象物の関係

の距離が大きくなり十分な精度が得られなくなる可能性がある。また、屋外で撮影を行う場合、カメラを設置する位置に制約が生じる場合が考えられ設置位置の制約から要求する精度を十分に得られない問題も考えられる。そこで、カメラの位置や画角、俯角によって、1 pixel が表す実空間距離がどのように変化するかを検討し、様々なパラメータの中から制約条件が発生した場合にどの程度の精度が保証されるのかについて検討をおこなった。

図-2 はカメラが撮影することのできる実空間の x 方向の断面である。ここに、撮影時の横方向、奥行き方向、高さ方向をそれぞれ x 方向、 y 方向、 z 方向とする。

カメラ高さを h 、縦方向の画角を 2θ 、俯角を α 、カメラ画像の縦のピクセル数を n_{cy} 、横のピクセル数を n_{cx} とする。図-2 において、 C はカメラの焦点を表し、 A' 、 B' は投影面上の上縁と下縁、 A 、 B はそれぞれ画像の下縁、上縁に対応する実空間上の点を表す。さらに、 P_i は画像のピクセルのうち、下から i 番目のピクセルの下縁に対応する実空間の点であり、2点 C 、 P_i の延長と y 軸との交点を Q_i とする。また、 Q_i における y 軸の垂線と直線 CQ_{i+1} の交点を R_i とする。つまり、画像の下から i 番目のピクセルの表す実空間長さは、 y 方向が Q_iQ_{i+1} 、 z 方向が Q_iR_i で与えられる。撮影した、画像の単位 pixel が表す実空間距離は、 y 座標のある画像部分の単位 pixel 長さを l_{yi} 、 z 座標を l_{zi} 、 x 座標を l_{xi} とするとそれぞれ式 (4)、(5)、(6) で表すことができる。

$$l_{yi} = \left\{ \frac{1}{\tan(\theta + \alpha) + \frac{2(i+1) \sin \alpha \sin \theta}{n_{cy} \sin(\theta + \alpha)}} \right\} h \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$l_{zi} = \left\{ \frac{\frac{2(i+1) \sin \alpha \sin \theta}{n_{cy} \sin(\theta + \alpha)} - 1}{\tan(\theta + \alpha) + \frac{2(i+1) \cos \alpha \sin \theta}{n_{cy} \sin(\theta + \alpha)}} \right\} h \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$l_{xi} = \left\{ \frac{\frac{1}{\tan(\theta + \alpha) + \frac{2i \sin \alpha \sin \theta}{n_{cy} \sin(\theta + \alpha)}} - 1}{1 - \frac{2i \cos \alpha \sin \theta}{n_{cy} \sin(\theta + \alpha)}} \right\} h \quad \dots\dots\dots (6)$$

算出される実座標と 1 pixel が表す実空間距離の関係を、カメラの位置と俯角を変えて検証実験を行った。実験の撮影対象範囲は大阪大学工学部実験棟屋上とし、研究棟の 4、5、6、8、9 階から基準点となるターゲット 9 個を撮影した。撮影範囲手前からカメラまでの水平距離を L 、カメラの高さを H 、俯角を α とし詳細な実験条件と結果を表-1 に示す。また、 x -rms は x 方向の実座標とカメラパラメータより算定された基準点の計算値の誤差の二乗平均平方根でありキャリブレーションの精度を評価するものである。 l_x は撮影範囲中一番大きい 1 pixel あたりの x 方向距離を表し、 l_y 、 l_z についても同様に表す。なお、縦方向の画角を 24 deg、横方向の画角を 43 deg として式 (4)、(5)、(6) を用いて算定した単位 pixel 当たりの誤差を表-1 に示す。

表-2 に誤差である二乗平均平方根とその方向で最も小さい単位 pixel 距離の比率を表している。 x 方向は、撮影範囲中一番大きい 1 pixel あたりの x 方向距離の 50

表-1 実験の条件と結果

	H (m)	α (deg)	l_x (m/pixel)	l_y (m/pixel)	l_z (m/pixel)
F4	4.83	17	0.0019	0.0457	0.0094
F5	8.48	34	0.0009	0.0185	0.0087
F6	12.33	44	0.0005	0.0145	0.0103
F8	20.04	55	0.0004	0.0155	0.0156
F9	23.89	59	0.0003	0.0183	0.0189

表-2 実験の結果

x -rms/ l_x	x -rms/ l_x	x -rms/ l_x
17.9	3.6	4.1
62.2	11.3	7.7
69	5.5	5.7
53.3	4.9	5.9
48	3.5	3.8

～70倍程度、 y 方向と z 方向については、それぞれの撮影範囲中一番大きい1 pixelあたり距離の3～10倍程度になると予想される。これらより、ある精度を要求してやると、1 pixelが表す実空間距離の許容値が設定され、カメラの位置・画角・俯角が式(4)、(5)、(6)より決定できる。

4. 3次元波面計測実験

2007年2月7日、大阪大学工学部屋外平面水槽において画像解析による波高計測に関する実験を行った。

カメラ設置高さ H を1.8 m、俯角 α を約45 degとし、縦方向の画角 2θ を1.2 deg、横方向の画角 2ϕ を2.1 degと画角を最小にして撮影した。撮影したターゲット

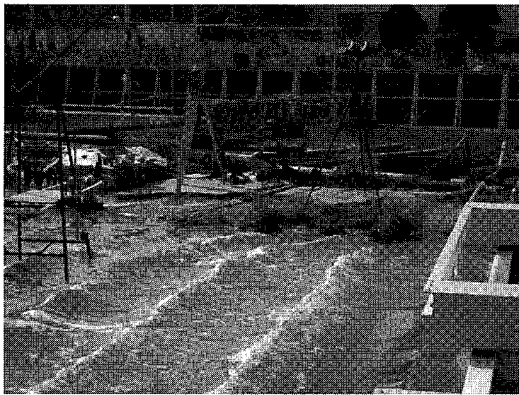
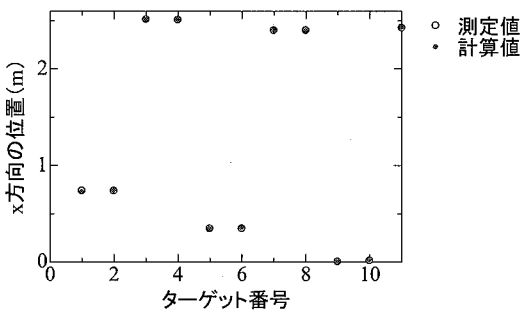
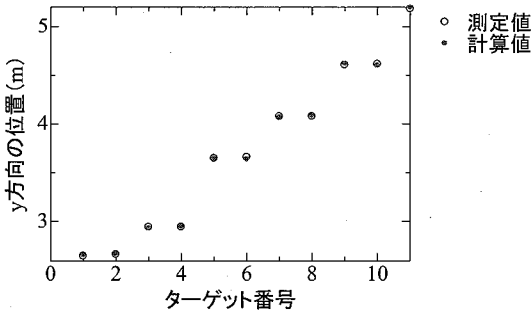


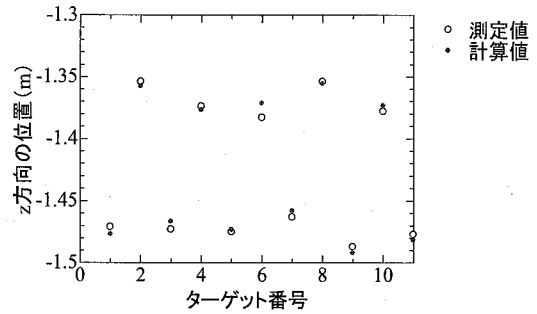
写真-2 実験状況



(a) ターゲットx座標

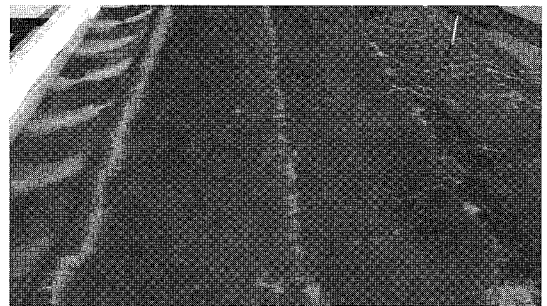


(b) ターゲットy座標

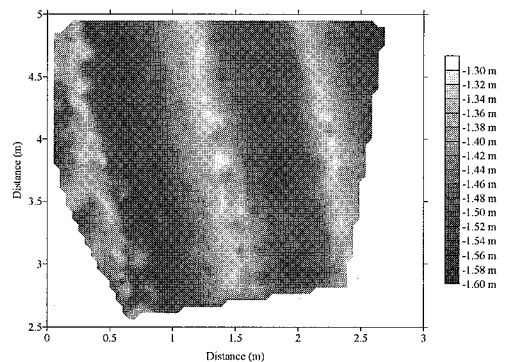


(c) ターゲットz座標

図-3 キャリブレーションの精度検証



(a) 解析に用いた画像($t=0s$)



(b) 3次元波面計測によって得られた波面の形状($t=0s$)

図-4 3次元波面計測結果 ($t=0s$)

は12点であるが、1点だけ画素の位置が読み取りにくかったため、キャリブレーションにはこれを除く11点を用いた。また、造波した波は周期0.7 sの規則波信号を造波機に入力し波を発生させた。写真-2に実験装置の配置の様子を示す。

図-3に11個の基準点の実座標とカメラパラメータより算定した実空間座標の比較を示す。測定値と計算値の誤差は z 方向で最大約1 cm程度であった。

画像解析を行う際に用いた検査ウインドウの大きさは、もっともマッチングされる点が多かった 28×28 pixelとし、相互相関係数の下限値は0.70と設定した。

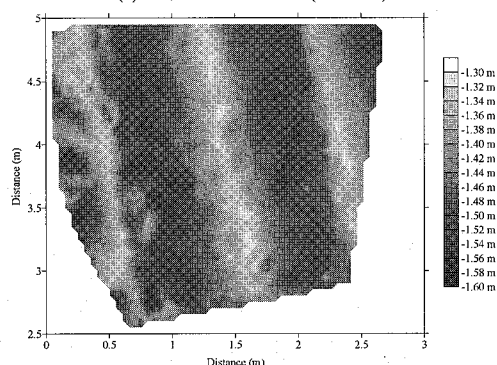
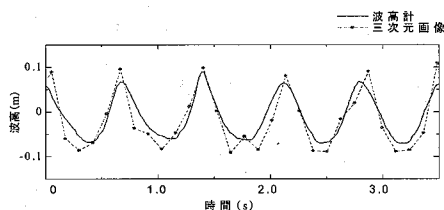
(a) 解析に用いた画像($t=0.067s$)(b) 3次元波面計測によって得られた波面の形状($t=0.067s$)図-5 3次元波面計測結果 ($t=0.067s$)

図-6 波高計と3次元計測によって得られた波高の時刻歴

画像解析を行う際に、水槽の底部が透過してしまいマッチングを行う際に海底部の輝度値でマッチングしてしまうミスマッチングが多く起こったため、水面の輝度値の特性に着目して以下のような制限を加えて画像解析を行った。本実験で造波した波浪は、碎波を伴っており気泡が水面に分布していたことと水面での光の反射による輝度値の特性が類似していたために輝度値によるマッチングの制限を加えた輝度値の下限値を変化させて試した結果、波面の凹凸が少なくなった125を輝度値の下限値とした。

図-4, 5に解析結果とそれに用いたカメラの画像を示す。図より波の峰に注目すると波面形状を再現できていると考えられる。しかし画像中にいくつかの突起形状の波面が存在することが確認できる。

図-6は波高計のデータと3次元画像から得られた波高を比較したものである。3次元波面計測結果は、30fpsのサンプリングで計測が行えるが解析時間を要するため10fpsとした。両者を比較した結果、波高計のデータと3次元画像から得られた波高の絶対誤差の3.5s間の平均値は2.8cmであった。

5. ま と め

民生用のデジタルハイビジョンカメラを用いて実験水槽で3次元計測を行った結果を以下にまとめる。

1. 水槽で造波した波面の形状を本システムで計測した結果、波面形状の各所に突起が解析されてしまうが定量的には波面の形状が計測できることが確認できた。波面の誤解析(突起)に関しては今後の検討が必要である。
2. 波高計で計測した時刻歴と本システムによって解析された波形を比較した結果、波高については2.8cmの誤差があり平均波高を13cmとすると21%の誤差がある。
3. カメラの画素数、画角、対象物のパラメータからシステムの精度を検討する手法を示した。
4. 本システムによって波面計測を行う際に水面が透過する場合には、輝度値による制約を設けることで水底面の形状を計測してしまうことが回避できることが確認できた。しかし、水面に気泡などが存在しない場合や水底面が透過している水面の計測に関しては検討が必要である。また、今回計測してしまった水底面は水中を透過、屈折して撮影された画像から計測されており実際の水底面ではないが、水底面と波面を計測する可能性があると考えられる。

参 考 文 献

- 服部昌太郎・佐藤敏夫(1979): 地上ステレオ・カメラによる碎波帯内の波の観測, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 148-151.
- 畑中郁美・江藤剛治・竹原幸生・高野保英(2004): ビデオカメラを用いたステレオ画像法による波高分布計測技術の開発, 平成16年度関西支部年次学術講演会概要, 土木学会関西支部, pp. II-66-1-II-66-2.
- 井口征士・佐藤宏介(2002): 3次元画像計測, 昭晃堂, pp. 91-99.
- 可視化情報学会編(2002): PIVハンドブック, 森北出版株式会社, pp. 68-191.
- Stefan, S., Z. Werner, S. Folke and H. Christian. (2004): Photogrammetric survey of the surf zone for calibration and validation of numerical models, proceedings of the 29th international conference, pp. 1343-1355.
- Justin, M. W., and Chin H. W. (2006): Automated trinocular stereo imaging system for three-dimensional surface wave measurements, Ocean engineering 33, pp. 723-747.