

画像解析による波浪計測手法に関する研究

有田 守¹・出口一郎²

本研究は、波面を面的に計測する手法について検討を行った。アルゴリズムは画像による 3 次元計測手法を用いており、2 台のカメラによって撮影された画像から波面の 3 次元座標を算出している。波面の 3 次元計測は、波面が光を反射すること、画像中の輝度値の変化が緩やかな場合に、画像中の同一点の決定が困難になる。本研究では、画像間の同一点を決定する際に、相互相関係数と検索範囲の条件で同一点を抽出し、最小二乗法によって 2 次抽出をすることで解析精度の向上を試みた。高解像度のデジタルカメラを使用して、実験水槽で造波した波面を撮影し 3 次元画像解析を行った結果と波高計によって計測した結果を比較し精度の検討を行った。

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、特に碎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。

画像解析によって波面を計測する研究は、ステレオ画像法を用いて、服部ら (1979) が試みているが研究当時は、計算機の発達が十分でなく画像間の同一点を決定するのが手作業であり波面を連続的にとらえるには多大な労力がかかった。近年になり計算機やデジタル画像機器の発展に伴って高解像度の画像解析が高速に行えるようになりデジタルカメラを用いた研究が、Stefan ら (2004) によって行われている。画像による波面計測は、2 台のカメラによって撮影された画像から同一点を同定することが困難な箇所が画像中に多く存在することが指摘されている (服部ら, 1979; Stefan ら 2004)。これらは撮影した画像の輝度値の分布が検査ウィンドウに対して大きい場合、水面の光の反射を近接する位置に設置されたカメラであっても撮影される画像がことなる映像となり画像の同定が困難になるためである。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。

本研究では、2 台のデジタルカメラにより高解像度の画像データを用いて実験水槽で造波させた波浪を撮影し、画像解析によって計測された波面と波高計によって計測した波浪とを比較することにより画像解析による波浪計測システムの検討を行った。

2. 3 次元計測

(1) ピンホールカメラモデル

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。

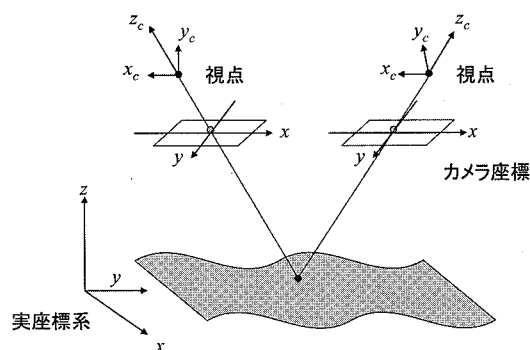


図-1 ピンホールカメラの座標系

一般的なピンホールカメラモデルは、次式で表すことができる。

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

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

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 ,

f, κ により表される x_0, y_0, z_0 周りの回転角である。

(2) カメラパラメータの算定

カメラパラメータは、同一平面上にない6点以上のキャリブレーション点を2台のカメラによって撮影しそれぞれの画像からキャリブレーション点に対応するカメラ座標を解析し、カメラパラメータがそれぞれ独立とみなして最小二乗法により算定する。式(1), (2)よりカメラパラメータを C とし、各キャリブレーション点に対応する方程式を整理して A とすると最小二乗法によって以下のようにカメラパラメータ C が算定できる。ここで、 X_n, Y_n, Z_n : キャリブレーション点の実空間座標、 X_{cn}, Y_{cn} : カメラ座標。

$$C = (A^T A)^{-1} A^T R \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここで、 A, C, R は

$$A = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1 X_{c1} & -Y_1 X_{c1} & -Z_1 X_{c1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1 Y_{c1} & -Y_1 Y_{c1} & -Z_1 Y_{c1} \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_2 X_{c2} & -Y_2 X_{c2} & -Z_2 X_{c2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & -X_2 Y_{c2} & -Y_2 Y_{c2} & -Z_2 Y_{c2} \\ X_3 & Y_3 & Z_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_3 X_{c3} & -Y_3 X_{c3} & -Z_3 X_{c3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_3 & Y_3 & Z_3 & 1 & -X_3 Y_{c3} & -Y_3 Y_{c3} & -Z_3 Y_{c3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -X_n X_{cn} & -Y_n X_{cn} & -Z_n X_{cn} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -X_n Y_{cn} & -Y_n Y_{cn} & -Z_n Y_{cn} \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \\ C_{21} \\ C_{22} \\ C_{23} \\ C_{24} \\ C_{31} \\ C_{32} \\ C_{33} \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots \cdots (5) \quad R = \begin{bmatrix} X_{c1} \\ Y_{c1} \\ X_{c2} \\ Y_{c2} \\ \vdots \\ X_{cn} \\ Y_{cn} \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

(3) 実座標の算定

(2)によって算定されたカメラパラメータ C は2台のカメラ L, R ごとに算定されているので、カメラパラメータと2台のカメラより撮影された画像より、ある物体の同一カメラ座標 $X_c^L, Y_c^L, X_c^R, Y_c^R$ が分かれば実空間座標が算定できる。2台のカメラの視線の交点は、カメラパラメータの算定手法と同様に式(8)を連立させて解くことができる。 V を物体の実空間座標としカメラパラメータ、画像座標を Q, F として最小二乗法によって式(7)の様に求められる。

$$V = Q^{-1} F \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

$$\begin{aligned} (C_{11}^L - C_{31}^L X_c^L) X + (C_{12}^L - C_{32}^L X_c^L) Y + (C_{13}^L - C_{33}^L X_c^L) Z \\ = C_{34}^L X_c^L - C_{14}^L \\ (C_{21}^L - C_{31}^L Y_c^L) X + (C_{22}^L - C_{32}^L Y_c^L) Y + (C_{23}^L - C_{33}^L Y_c^L) Z \\ = C_{34}^L Y_c^L - C_{24}^L \\ (C_{11}^R - C_{31}^R X_c^R) X + (C_{12}^R - C_{32}^R X_c^R) Y + (C_{13}^R - C_{33}^R X_c^R) Z \\ = C_{34}^R X_c^R - C_{14}^R \\ (C_{21}^R - C_{31}^R Y_c^R) X + (C_{22}^R - C_{32}^R Y_c^R) Y + (C_{23}^R - C_{33}^R Y_c^R) Z \\ = C_{34}^R Y_c^R - C_{24}^R \end{aligned} \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

式(8)を連立させて解くのでマトリックス F, Q, V は式(9), (10), (11)となる。ここで C はカメラパラメータ、 X_c, Y_c は画像座標、 X, Y, Z は実座標である。

$$F = \begin{bmatrix} C_{34}^L X_c^L - C_{14}^L \\ C_{34}^L Y_c^L - C_{24}^L \\ C_{34}^R X_c^R - C_{14}^R \\ C_{34}^R Y_c^R - C_{24}^R \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots \cdots (9)$$

$$Q = \begin{bmatrix} C_{11}^L - C_{31}^L X_c^L & C_{12}^L - C_{32}^L X_c^L & C_{13}^L - C_{33}^L X_c^L \\ C_{21}^L - C_{31}^L Y_c^L & C_{22}^L - C_{32}^L Y_c^L & C_{23}^L - C_{33}^L Y_c^L \\ C_{11}^R - C_{31}^R X_c^R & C_{12}^R - C_{32}^R X_c^R & C_{13}^R - C_{33}^R X_c^R \\ C_{21}^R - C_{31}^R Y_c^R & C_{22}^R - C_{32}^R Y_c^R & C_{23}^R - C_{33}^R Y_c^R \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

$$V = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

(4) 画像のマッチング

2台のカメラによって撮影された画像から同一点を算定する方法は、直接相互相関法 (direct cross-correlation method) を用いた。この方法は、局所的な輝度値パターンの類似度を相互相関で評価する手法である。

2つの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。ただし、検査領域サイズを $N \times N$ pixel とすると、相互相関関数は式(12)の通りである。

$$C_{fg}(\Delta X, \Delta Y)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(X_i, Y_j) - f_m\} \{g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y) - g_m\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(X_i, Y_j) - f_m\}^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y) - g_m\}^2}} \quad \cdots \cdots \cdots (12)$$

本研究では、画像のマッチングを行う際にウインドウと相互相関係数の値を設定し両者を満たす場合に同一点として解析している。この2つの条件を満たす点は画像内に数多く存在するため検索範囲を設定して、その範囲内で検索を行いその中のペアから相互相関係数が最も高いペアを同一点としている。

画像のマッチングは、2台のカメラによって撮影された画像をそれぞれ左画像と右画像とする。同一点の解析

には左画像を基準に右画像の中から同一点を検索していく。この場合、相互相関係数と検索範囲の制限だけでは不適切な同一点を解析してしまう問題がある。図-2には左画像の y 軸を1,000と固定し x 軸を増加させて右画像の同一点を検索していったときに、同一点として解析された右画像の各画素の座標をプロットした物である。図からもわかるように左画像の y 軸上の画素に対応する右画像の画素は1次関数上にプロットされる。図-2中の実線は解析された右画像の画素を最小二乗法によって近似した物である。本研究では、左画像に対する右画像の同一点を解析する際に左画像の y 軸上に対応する右画像の画素をそれぞれ相互相関係数によって解析し、それらを最小二乗法によって近似し得られた近似直線付近の点のみを同一点とみなしている。本研究では、図-2に示すとおり近似直線の $y \pm 1$ の範囲に入る画素を同一点として解析した。

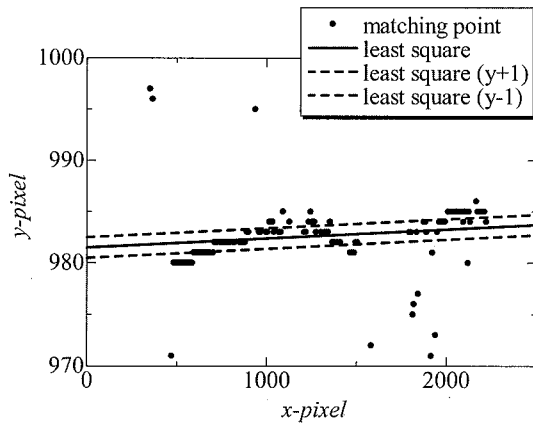


図-2 マッチング手法

3. 水槽実験

(1) 実験概要

2台のカメラを用いて実験水槽で発生した波浪を撮影し、その画像から波浪場の解析を試みた。実験に使用した水槽は長さ10 m 幅20 mの一部を使用して周期0.7 sの規則波を入力信号として造波を行った。発生した波面を本システムによって撮影し解析を行った。撮影に用いたカメラは、CANON EOS kiss digital Nを2台使用し撮影の同期を取るためにリモートコントローラCANON TC-80N3を改造し2台のカメラの撮影の同期を行っている(写真-1)。

キャリブレーション用のターゲット12点を設置した様子を図-3に示す。図-3の縦軸、横軸はカメラ座標を示している。キャリブレーション用の画像を撮影した後、にキャリブレーション治具を撤去し造波を行った。キャ

リブレーション用のターゲットは直径約2 cmの発泡ウキを使用した。キャリブレーションの実座標は3次元光波測定器によって実座標を計測した。

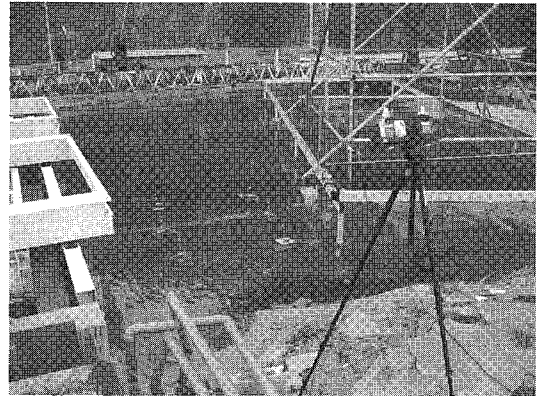


写真-1 画像記録装置

(2) キャリブレーションの精度

キャリブレーション画像より12点のキャリブレーション画像座標を解析し、式(3)よりカメラパラメータを算定し、得られたカメラパラメータとカメラ座標によってキャリブレーションの座標を再度算定し直しカメラパラメータの精度を検証した。

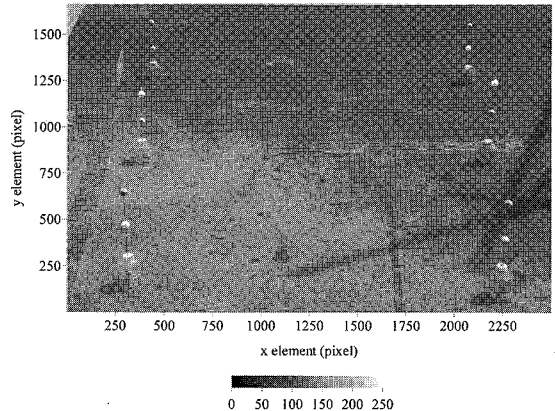


図-3 キャリブレーション装置

図-4にキャリブレーション点の実座標と算定したカメラパラメータを用いて計算したキャリブレーション点の比較結果を示す。図-4より両者の差は最大で3 mm程度であった。

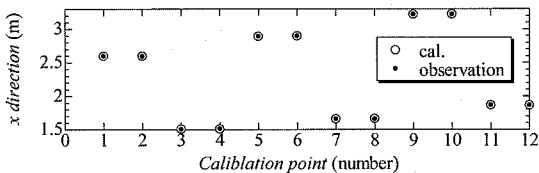
(3) 3次元計測

本研究で造波した波は、波面計測のために波高をできるだけ大きくするために砕波する直前まで造波機のストロークを設定している。撮影された波浪は造波開始から時間が経過しており、反射波も含まれる状態であった。そのため波高計によって計測された波高は10.8 cmで

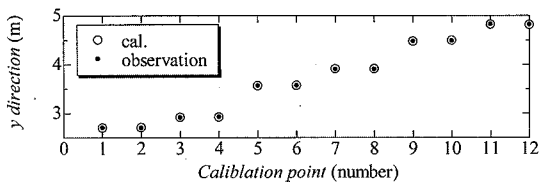
あり、周期 7.0 s 水深 40 cm の波長を 76 cm とした場合、波高と波長の比率が 0.14 となっている。このような波浪場について計測を行っている。

図-5 は、波面を撮影した輝度値のデータであり縦軸、横軸はカメラ座標である。撮影された画像は R, G, B の輝度値のデータとして変換した後に左画像を基に 33×33 画素のウィンドウで右画像と一致する箇所を検索した。ウィンドウの大きさは、ウィンドウのサイズを変化させてマッチングが最も良いと思われる大きさのサイズを決定した。相互相関係数は、Stefan (2004) より 0.7 以上の値を取るものをマッチングの条件とした。本研究では、撮影した画像が R, G, B の輝度値についてそれぞれにマッチングを試みたが B の輝度値を用いて解析した場合がマッチングの箇所が最も多くなったため本報では、B の輝度値について解析を行った結果を示す。図-6 に画像解析によって算出された波面形状を示す。図-5 と 6 を比較し定性的には 3 次元波面形状を解析できることが確認できる。図-5 の画像より解析された 3 次元波面形状では波高、波長の解析がわかりにくいので、図-7 に波長の解析が行いやすいように図-6 を撮影してから約 0.33 s 後に撮影された画像解析結果を示す。実験水槽の水深は 0.4 m であり 0.7 s の周期の波長は 0.76 m であるのに対して図-7 より波長を読み取ると 0.78 m であり 2 cm の差があることがわかる。

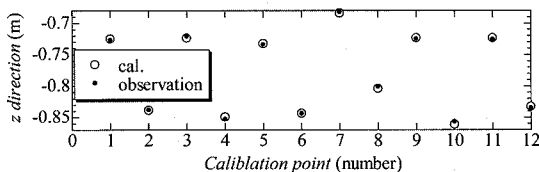
図-8 に図-7 で解析した波面を x 方向から見た波面の



(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-4 キャリブレーションの精度検証

鉛直分布を示す。図-8 より画像解析による波高は、11.5 cm であった。また波高計で計測された波高は 10.8 cm であり両者を比較すると 7 mm の誤差があることが確認できる。この差を波高計で計測された波高に対する誤差として評価すると約 6 % である事が解った。

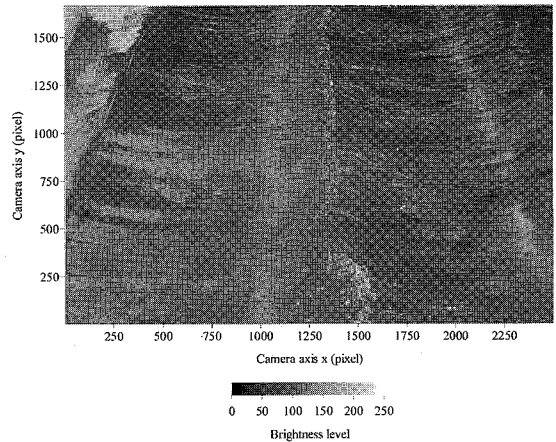


図-5 右カメラの画像 (周期 0.7s)

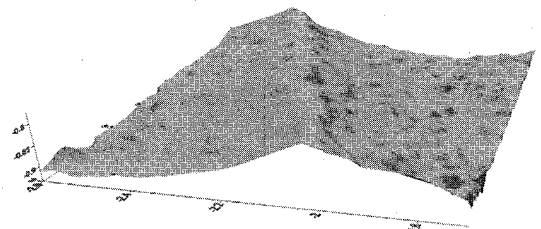


図-6 画像解析による波面形状

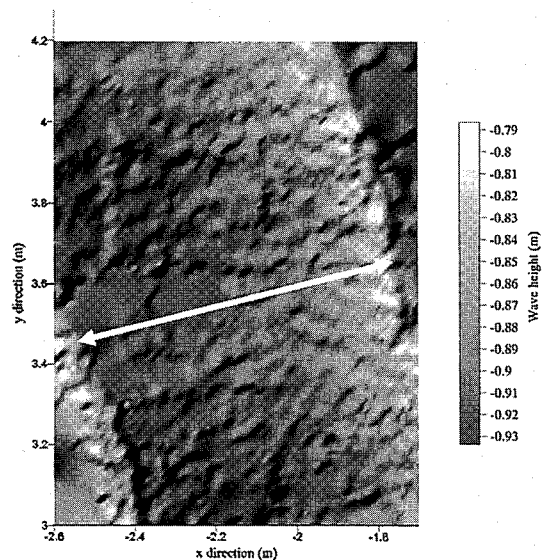


図-7 画像解析により算出された波面

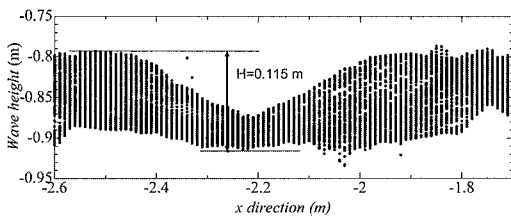


図-8 解析による波面の鉛直分布

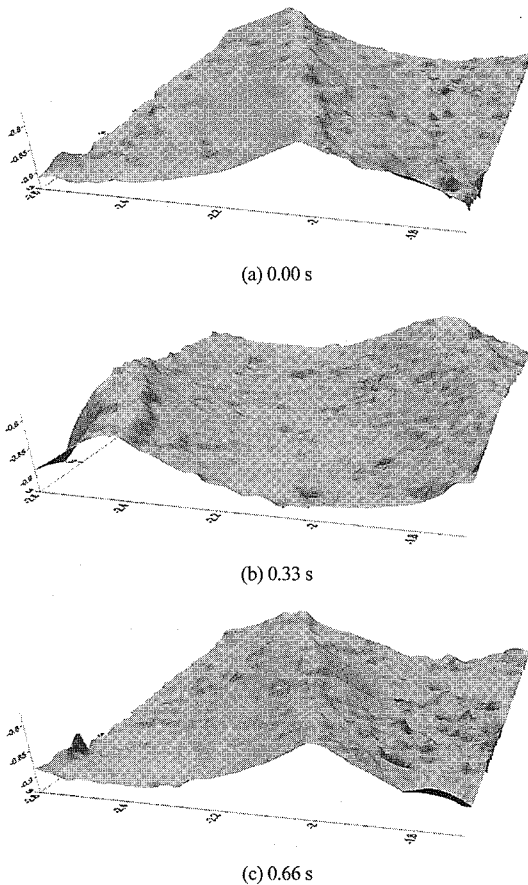


図-9 3次元計測による波面の時系列変化

図-9にカメラによって連続撮影を行った解析結果を示す。実験に使用したカメラは、1秒間に3枚の画像を撮影するために0.33sのサンプリングとなる。時々刻々と波面が変化し波面の反射、また影の影響等で輝度値に様々な変化が生じて、本手法で精度の良い計測が行えると考えられる。但し、図-9(b), (c)では数カ所に不適切なマッチングの影響で波面形状に小さな突起が

存在している。局所的には、マッチングの手法を検討する必要がある。

4. おわりに

画像による波浪解析手法の例を示し水槽実験によって造波した波浪を計測した結果以下の事が解った。

- 1) 本システムは、波高に関しては波高計で計測された波高と本システムで解析された波高を比較し約6%の精度である事が確認できた。
- 2) 画像の同一点を決定する際に、相互相関係数と検索範囲である程度のペアを抽出し、最小二乗法によりその中のペアを選定することで計測精度が向上することが解った。ただし、まれに不適切な同一点も抽出する場合もあり、今後の検討が必要であると考えられる。
- 3) 本研究では、R, G, Bの輝度値の画像データを用いて解析を行ったが、本研究においてはBの輝度値を用いた場合がマッチングの精度が最も良いことが解った。

本研究では、高解像度の画像データを使って波面計測を行っており計測精度が高いことが確認されたが、今後ビデオ画像を用いて解析する場合には、画像の解像度が低くなり少ない画像データで精度の高い3次元計測手法を検討しなければならない。

謝辞：本研究は、文部科学研究費の助成を受け実施しました。また、土木学会関西支部の調査研究「ローカル・リモートセンシング技術の実用化に関する調査研究」の助成によるものであり、ここに記して謝意を表します。

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.
- 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. (2005) : Automated trinocular stereo imaging system for three-dimensional surface wave measurements, Ocean engineering.
- 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，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)：三次元画像計測，昭見堂，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. 68-80, 165-191.