

固体・液体表面の3次元形状計測法の開発

Image measurements of three-dimensional shapes of solid objects and liquid free-surfaces

渡部靖憲¹・三戸部佑太²

Yasunori WATANABE and Yuta MITOBE

This paper presents the novel imaging technique for localizing the surfaces of solid objects and the liquid freesurface in three-dimensional space. In this method, colour grids, projected from a PC projector, illuminating the surface of object, is recorded by a digital camera to specify the relative relation of the projector and camera coordinates for the grid locations. The shape of the object can be estimated from a pin-hole model for the determined relation. This system was found to be capable of measuring the three-dimensional coordinates of any solid surfaces at high accuracy with mean error less than 0.1 mm through a series of verifications.

1. はじめに

本研究は、プロジェクター照明下の任意物体を1台のデジタルカメラで撮影することにより、その3次元表面形状の座標を計測する新たな画像計測システムを提案するものである。本開発システムは、海岸工学において研究から施工に至るまでの広い分野において適用可能な有用な3次元計測ツールとなるポテンシャルを有する。即ち、回折、屈折波等3次元性波浪の面的計測、消波ブロック等の飛散状況の数値化、船体動揺試験における船体自体の3次元形状座標の追跡さらには、汀線管理の数値的評価、被災時の複雑な構造物変位など、物体あるいは液体の表面3次元形状を数値的に取得可能となれば作業の合理化、定量的評価、管理の高度化に大きく寄与すると考える。

本研究で提案する計測法は、既に商品化されている2台のカメラによるステレオグラム法とは異なり、画像相関によるマッチングを必要としないため光学的環境に依存せず、また撮影画像パターンが変化しない物体に対しても高精度で体積的な3次元座標を取得可能とする極めて有用なものである。本研究では提案する計測アルゴリズムを説明すると共に、多様な物体、液体表面形状の計測を通してその信頼性と有効性を検証する。

2. 計測アルゴリズム

本計測法では、既知である投影カラー座標をPCプロジェクターにより物体に照射し、物体表面で反射するカラー座標を1台のデジタルカメラによって撮影する。図-1に示すように、カメラ及びプロジェクター両者についてピンホールモデルを適用し、カメラ座標の原点 $O_c(o_{cx}, o_{cy}, o_{cz})$ 、プロジェクター座標の原点 $O_p(o_{px}, o_{py}, o_{pz})$ として、それぞれ対象とする物体上の点 $M(X, Y, Z)$ を投影する画像座標平

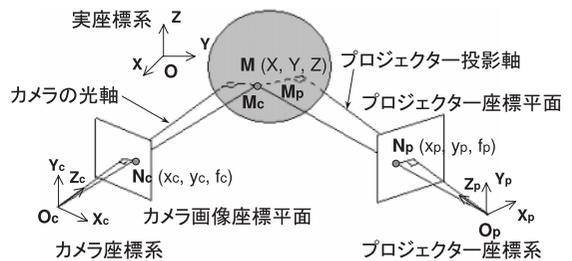


図-1 ピンホールモデルと座標系

面を考える。カメラ座標系における物体上の点 M_c の座標と M_c が撮影画像に投影された点 N_c の座標の間には、その奥行き z_c の比から次の関係が成り立つ。

$$x_c = f_c \frac{X_c}{Z_c}, y_c = f_c \frac{Y_c}{Z_c} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 (X_c, Y_c, Z_c) を M_c 、 (x_c, y_c, f_c) を N_c のカメラ座標とする。ここで、 f_c はカメラの焦点距離である。幾何学的関係から、次式を得る。

$$\overrightarrow{O_c N_c} = \frac{f_c}{O_c M_c \cdot k_c} \overrightarrow{O_c M_c} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\vec{k}_c = (k_{cx}, k_{cy}, k_{cz})$ はカメラの光軸方向単位ベクトルである。式(2)の両辺とカメラ座標系における水平方向単位ベクトル $\vec{i}_c = (i_{cx}, i_{cy}, i_{cz})$ および鉛直方向単位ベクトル $\vec{j}_c = (j_{cx}, j_{cy}, j_{cz})$ との内積をとると、

$$\overrightarrow{O_c N_c} \cdot \vec{i}_c = \frac{f_c}{O_c M_c \cdot k_c} \overrightarrow{O_c M_c} \cdot \vec{i}_c = x_c \dots\dots\dots (3)$$

$$\overrightarrow{O_c N_c} \cdot \vec{j}_c = \frac{f_c}{O_c M_c \cdot k_c} \overrightarrow{O_c M_c} \cdot \vec{j}_c = y_c \dots\dots\dots (4)$$

同様にプロジェクター座標系において、投影画像上の点 N_p とそれが物体上に投影された点 M_p の座標の間には次の関係が成り立つ。

$$\overrightarrow{O_p N_p} \cdot \vec{i}_p = \frac{f_p}{O_p M_p \cdot k_p} \overrightarrow{O_p M_p} \cdot \vec{i}_p = x_p \dots\dots\dots (5)$$

1 正会員 博(工) 北海道大学准教授大学院工学研究科
 2 学生会員 北海道大学大学院工学研究科

$$\vec{O_p M_p} \cdot \vec{j_p} = \frac{f_p}{O_p M_p \cdot k_p} \vec{O_p M_p} \cdot \vec{j_p} = y_p \dots\dots\dots (6)$$

ここで $\vec{i_p} = (i_{px}, i_{py}, i_{pz})$, $\vec{j_p} = (j_{px}, j_{py}, j_{pz})$, $\vec{k_p} = (k_{px}, k_{py}, k_{pz})$ はプロジェクター座標系における各方向単位ベクトルである。 M_c および M_p が計測対象上の同一点 $M(X, Y, Z)$ である場合、式 (3) は次のように変形できる。

$$X(x_c k_{cx} - f_c i_{cx}) + Y(x_c k_{cy} - f_c i_{cy}) + Z(x_c k_{cz} - f_c i_{cz}) = x_c (\vec{O_c} \cdot \vec{k_c}) - f_c (\vec{O_c} \cdot \vec{i_c}) \dots\dots\dots (7)$$

同様に式 (4), (5), (6) を変形し、次の連立式を得る。

$$TX = B \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$$X = \begin{pmatrix} X & Y & Z \end{pmatrix}^T$$

$$T = \begin{pmatrix} x_c k_{cx} - f_c i_{cx} & x_c k_{cy} - f_c i_{cy} & x_c k_{cz} - f_c i_{cz} \\ y_c k_{cx} - f_c j_{cx} & y_c k_{cy} - f_c j_{cy} & y_c k_{cz} - f_c j_{cz} \\ x_p k_{px} - f_p i_{px} & x_p k_{py} - f_p i_{py} & x_p k_{pz} - f_p i_{pz} \\ y_p k_{px} - f_p j_{px} & y_p k_{py} - f_p j_{py} & y_p k_{pz} - f_p j_{pz} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} x_c (\vec{O_c} \cdot \vec{k_c}) - f_c (\vec{O_c} \cdot \vec{i_c}) \\ y_c (\vec{O_c} \cdot \vec{k_c}) - f_c (\vec{O_c} \cdot \vec{j_c}) \\ x_p (\vec{O_p} \cdot \vec{k_p}) - f_p (\vec{O_p} \cdot \vec{i_p}) \\ y_p (\vec{O_p} \cdot \vec{k_p}) - f_p (\vec{O_p} \cdot \vec{j_p}) \end{pmatrix}$$

行列 T および B に含まれる値のうち、 (x_c, y_c) , (x_p, y_p) はプロジェクターから既知の投影座標をもつカラーグリッドを投影し、それをカメラで撮影し画像座標で特定できるため、既知となる。残りの未知数であるプロジェクター座標系の各方向単位ベクトル、原点の実座標、焦点距離を次に説明するキャリブレーションによって取得すれば、式 (8) の最小二乗解として、物体表面の3次元座標 X を算出することが可能である。

キャリブレーションでは、予め実座標が既知である複数の格子にカラー座標を照射し、格子上に投影されたカラー座標をカメラで撮影する。プロジェクター光軸上の任意の複数の異なる位置の実座標並びに任意のカラー座標の実座標が与えられれば、プロジェクターの投影軸方向単位ベクトル $\vec{k_p}$ 及びプロジェクター座標系の原点 O_p の実座標が決定できる。カメラ座標系についても同様に、カメラの光軸方向単位ベクトル $\vec{k_c}$ およびカメラ座標原点 O_c の実座標を求めることが可能である。

次にカメラ座標系およびプロジェクター座標系における水平方向単位ベクトル \vec{i} 、鉛直方向単位ベクトル \vec{j} 、焦点距離 f を求める。まず、

$$\vec{P} = (P_x, P_y, P_z) = \frac{\vec{O_c M_c}}{O_c M_c \cdot k_c} \dots\dots\dots (9)$$

とおくと、式 (3) は次のように変形できる。

$$x_c = P_x f_c i_{cx} + P_y f_c i_{cy} + P_z f_c i_{cz} \dots\dots\dots (10)$$

上式の最少自乗和及びカメラの光軸方向単位ベクトル $\vec{k_c}$ と水平方向単位ベクトル $\vec{i_c}$ の直交条件

$$\vec{i_c} \cdot \vec{k_c} = i_{cx} k_{cx} + i_{cy} k_{cy} + i_{cz} k_{cz} = 0 \dots\dots\dots (11)$$

に対して次式を得る。

$$\begin{pmatrix} \sum P_x^2 & \sum P_x P_y & \sum P_x P_z \\ \sum P_x P_y & \sum P_y^2 & \sum P_y P_z \\ \sum P_x P_z & \sum P_y P_z & \sum P_z^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_c i_{cx} \\ f_c i_{cy} \\ f_c i_{cz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_c P_x \\ \sum x_c P_y \\ \sum x_c P_z \\ 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (12)$$

上式において (P_x, P_y, P_z) , x_c はキャリブレーションの際には既知であり、 $f_c i_{cx}$, $f_c i_{cy}$, $f_c i_{cz}$ の最小二乗解を求めることで、 f_c および $\vec{i_c}$ を求めることができる。同様の計算を行うことで、 $\vec{j_c}$, $\vec{i_p}$, $\vec{j_p}$, f_p のデータを取得する。

3. 実験方法

本計測法ではカラー座標としてカラーパターン (図-2 参照) を物体に投影し、物体表面で反射した各ブロックの重心の画像座標を入力値として与える。このカラーパターンは、隣接する色が全て異なるように配置されており、複雑な形状の物体表面で反射した場合でも、任意のブロックのプロジェクタ座標を特定することができる。各ブロックは、画像座標上でブロック形状が十分解像でき重心を算出することができるサイズである必要があり、かつ対象物体の形状変化の長さスケールより小さくする必要がある。撮影されるブロックサイズは、プロジェクタ及びカメラと対象物体までの距離、及び物体の変形度合に依存するため、撮影環境及び対象物体に応じて撮影画像を確認する必要がある。また、プロジェクタの投影光の強度は、プロジェクタからの距離の2乗に反比例して減衰するため、計測領域を大きくするためには高出力のプロジェクタが必要である。

デジタルカメラにより撮影されたカラー座標は、撮影画像における各ピクセルのRGB値を $L^*a^*b^*$ 値に変換することによりカラー抽出を行いその座標を特定した。 L^* , a^* , b^* はそれぞれ色の明るさ、緑-赤方向の色合い、青-黄方向の色合いを表す値であり、これら3つの値による色の表現は人間の色覚に近いとされ、色を識別する処理に多く用いられている。一般に光の反射強度は、物体の光の吸収スペクトルに依存する。即ち、高い吸収スペクトルのレンジの色は反射され難いため、材質に応じて投影した色が抽出できない可能性がある。これについては、対象物の材質に応じた投影色の変更が必要となるが、本研究で対象とした反射率の高い白色のコンクリートでは、色に依存する反射強度の低下はみられなかった。

本研究では、直方体ブロック、模型消波ブロック等の固体および造波水槽における水面形の動的計測を行い精度並びに適応性を調査した。固体物体に対しては、図-3に

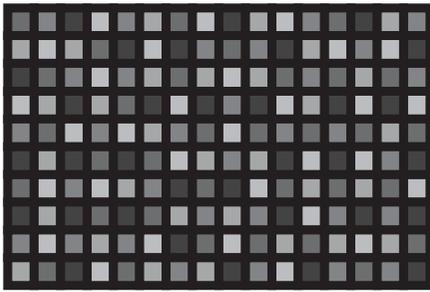


図-2 投影するカラーパターン (赤, 緑, 青, マゼンタ, シアンの5色で色分けされる)

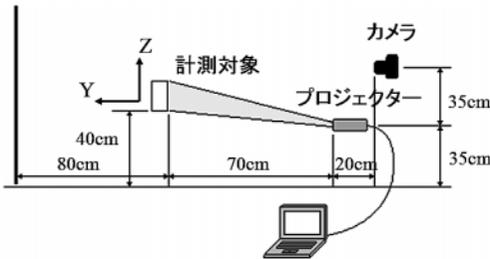


図-3 固体表面計測に対する実験装置の構成

示すように、プロジェクター (解像度 1024×768 , 輝度 3000ルーメン) の約20cm後方, 35cm上方にカメラ (解像度 1600×1200) を設置し, プロジェクターの約70cm前方に対象物体を設置し, 3次元形状計測を行った. キャリブレーションは対象物体の前後, 15cm間隔で較正用格子を設置して行った. 液体の自由水面計測では, 延長8m, 幅25cm, 高さ40cmの2次元造波水槽において, 進行波および水路内に設置した円柱状コンクリートブロック上を波が通過する際の3次元的な水面変形の計測を行った (図-4参照). 水平床上の造波水槽上にカメラとプロジェクターを固定し, 水深20cm, 入射波高5cm, 周期0.8秒の波浪について実験を行った. 動画の撮影は30fpsで行った. 同一条件の波を12cm間隔で設置した2本の容量式波高計により計測し, 本計測法による計測結果との比較を行う. なお, 水は透過率が高いため, 水面に投影したカラー座標は水面で反射せず, そのままでは撮影ができない. 本実験では, 水路内の水に溶解性微粉末を混入し, 白濁させて反射率を増加させ計測を行った.

4. 結果

(1) 固体表面計測

図-5は, $100 \times 60 \times 200$ mmの直方体コンクリートブロックにカラーパターンを照射し, 計測された3次元表面座標をプロットし, 実測値と比較したものである. なお, カラーパターンが撮影されている領域のみに対して座標化されるため, ブロックの2つの側面の形状が座標化されている. それぞれのカラーパターンに対応する点について

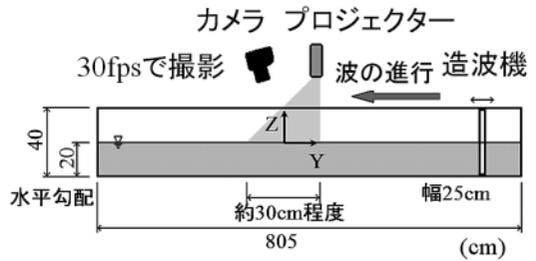


図-4 自由水面計測に対する実験装置の構成

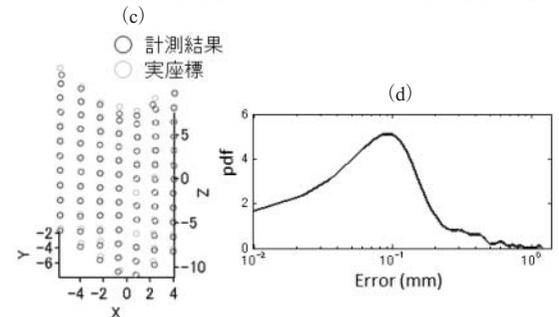
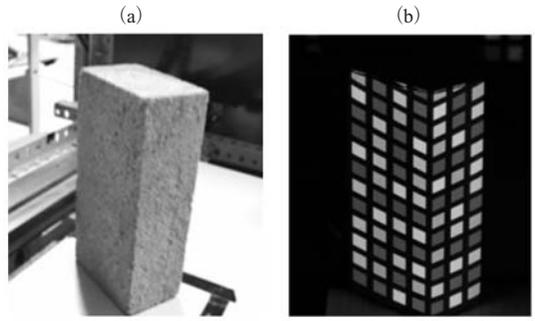


図-5 コンクリートの直方体ブロック (a), 計測時の撮影画像 (b). 計測結果 (c, 単位: cm) と誤差の確率密度分布 (d)

ブロック上の座標を実測したものと比較すると若干差異がある点も存在するが, 適切に直角に交わるブロック側面の表面形状が計測されていることがわかる. 実測値と本計測法による計測値の差の確率密度分布から, 誤差ピークは約0.09mm, 最大誤差は約0.4mmと本計測法の高い精度を確認することができる.

前述のように本計測法はカラーパターンが撮影されている表面のみ座標化を可能とするが, 同一物体を物体の背後から撮影し座標を合成することで, 物体全面の座標を取得することができる. 図-6は, 模型テトラポッドを 120° ずつ視軸を回転させて3方向から撮影し, 座標を合成した結果をプロットしたものである. ブロックのゆるやかな曲面が連続的に変化する独特の形状を適切に再現しているのがわかる. 図-7は, 模型六脚ブロックに対して同様に計測し, ブロックの全面の形状を再構成したものである. 全ての面について正しく計測され, 座標の合成が行われていることがわかる.

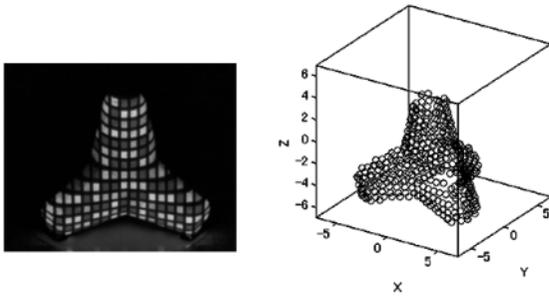


図-6 模型テトラポッド計測時の撮影画像 (左) と計測結果 (右). 単位: cm.

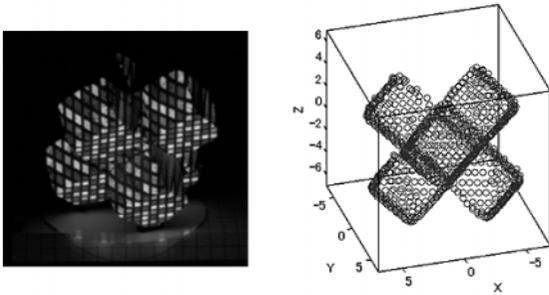


図-7 模型六脚ブロック計測時の撮影画像 (左) と計測結果 (右). 単位: cm.

さらに複雑な形状をもつ構造物に対しても適切に表面座標の数値化が行われ良好な結果を得ることができる。図-8は、テトラポッドを二層整積した模型消波堤を撮影した原画像と計測した表面座標をプロットしたものである。なお、複雑な形状を認識し易い様に鉛直座標に比例するグレイスケール濃度でプロットを表している。ブロックの影になり照明が到達しない空隙内の座標化はできないため欠測箇所が存在するが、それ以外の構造物の外表面についてはブロックの重なりや詳細な組み合わせを良く座標化できているのがわかる。この計測システムにより室内での消波構造物の安定実験等において、波浪によるブロック飛散や変形の数値的な評価を可能とし、その性能の詳細な定量的検討を実現できる。

(2) 自由水面計測

本計測システムは、カラーパターンが照射された計測領域を動画撮影することで、動的に物体の三次元形状を追跡可能である。さらに、液体についても照明の水中への透過を阻止し水面近傍で反射させることができれば、動的に自由水面形状を計測できる。図-9は、溶解性白色粉末で水を白濁させた進行波の水面形を計測した結果である。動的な自由水面の変動が数値化され、水路横断方向に一様な典型的な微小振幅波形が取得されていることが、波速を基に各位相の座標を空間的に合成した結果からわかる (図-9 (e) 参照)。

図-10は、計測領域中央における水位変化の時系列と容

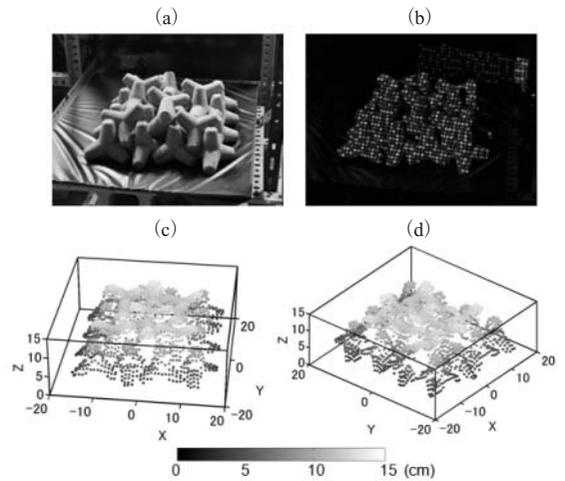


図-8 模型テトラポッド2層整積消波堤 (a) と計測時の撮影画像 (b). 異なる角度に対する計測結果のプロット (c) (d). 単位: cm

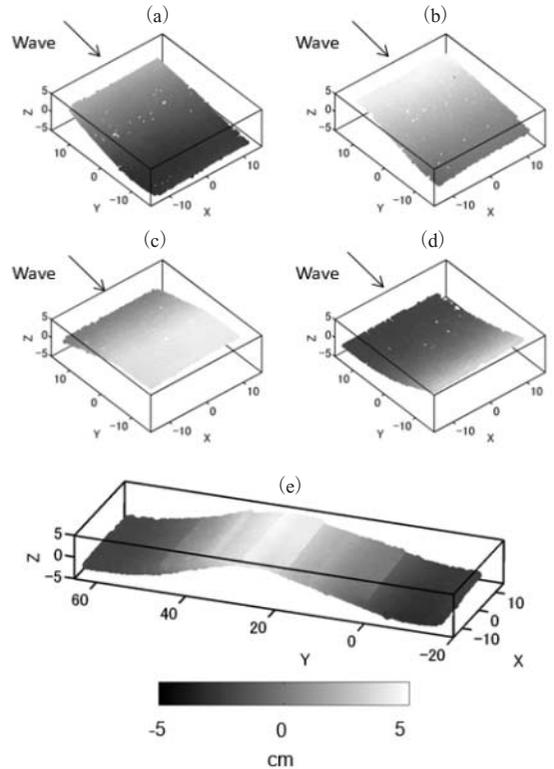


図-9 造波水槽中の進行波の計測結果 (a) (b) (c) (d) : 0.13s 間隔. 計測座標の合成による進行波形状の再現 (e). 単位: cm

量式波高計によって計測されたそれとを比較したものである。両者は概ね一致しているが、位相によって最大5mm程度の差異が確認された。これは、カラーパターン照明の白濁した水中への透過深と一致しており、照明が完全に水面で反射されていないことに起因するものであり、本

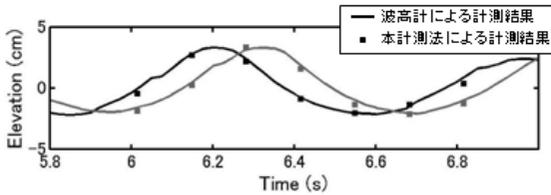


図-10 波高計で計測された水位変動と本計測法との比較

計測システムの直接的問題ではなく、混入粉末あるいは染料を変更するなど撮影媒体の透過率を低減することで誤差を減少させることができると考える。

水面の光の透過に起因するある程度の誤差を許容した上で、三次元的な波浪の自由水面変形の時間変化を計測し、本計測法による面的波浪計測の可能性を調査する。図-11は、二次元造波水槽の中央に高さ20cm直径10cmのコンクリート円柱を設置し、その周辺の空間的水位変動を計測したものである。進行波の波峰が通過後に同心円状に放出される典型的な円筒波が軸対象に伝達している様子が計測されているのがわかる。瞬時の平面的水位変動を計測する手段が他にないため、計測結果の精度を検討することはできないが、その変動の特徴は合理的であり適当に水路横断方向に変化する水面形状の数値化がされているものとする。

本計測法は、光の透過に係る誤差は生じるものの、瞬時の面的な水位変動を計測できるため、屈折、回折を含む多様な面的波浪状況を時々刻々定量的な評価を可能とするものであり、平面水槽実験における静穏度評価や構造物近傍の局所波浪変形の定量化、数値計算結果との照合、精度評価など多様な研究に利用できるものとする。なお動的計測において、瞬時の投影カラーパターンを撮影できれば、原理的には任意の速度で移動する物体あるいは液体に適用可能である一方、高速移動する対象に対しては短時間のシャッタースピードで撮影する必要がある、これに応じた高出力のプロジェクタが必要となるであろう。

5. 結論

本研究で開発した物体の3次元表面座標計測法は、プロジェクター照明が照射された物体を撮影した1枚の画像から精度良く表面座標を計測するものであり、従来のステレオグラム法の使用制約がない応用性、信頼性の高いものである。表面座標が既知である直方体ブロックを対象とした計測誤差は0.09mmであり、高精度で計測を行えることが明らかになった。

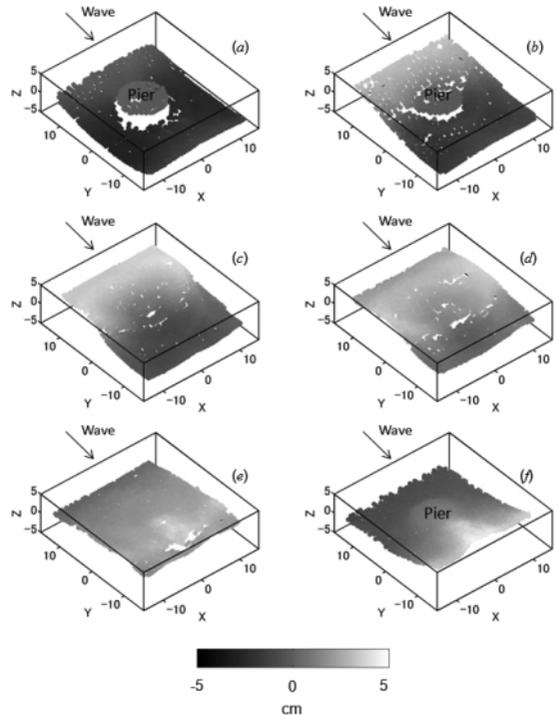


図-11 進行波がコンクリート円柱を過る時の水面形計測結果。単位：cm

本計測法では、計測により得られる物体の表面座標を同一物体の背後から計測を行うことで得られる座標と合成することで、その物体全体の表面形状を取得できる。模型テトラポッドおよび模型六脚ブロックの計測により、曲面やエッジを有する物体に対しても表面全域の座標を正確に計測可能であることを確認した。また、模型テトラポッド2層整積消波堤に対して計測を行い、ブロックが重なり合う非常に複雑な形状を持つ構造物に対して表面座標の数値化が適切に行われることを確認した。本計測法により様々な構造物の変形や移動を数値的に評価することが可能であり、消波構造物の安定実験等多様な実験や調査への適用が可能である。

造波水槽中の進行波の計測から、本計測法の動的な波面計測への適用性と信頼性を確認した。本計測法では波と構造物の相互作用等による多様な面的水位変動を動的に計測することが可能であり、様々な研究への適用が可能である。

参考文献

徐剛・辻三郎(1998)：3次元ビジョン，共立出版，181p.