

複雑な3次元水面形状の計測システム開発

Measuring system for 3-D shapes of complicated water surface

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 三戸部佑太 (Yuuta Mitobe)
 北海道大学大学院工学研究科准教授 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

砕波は海岸で見られる一般的な現象であり、海岸付近での大気海間の物質輸送や水中での砂の移動に対して非常に重要な役割を果たしている。しかし、砕波の性質については解明されていないことが多い。砕波時の水の流れを解明するためには砕波時の水中での圧力分布を知る必要があるが、水中での圧力を支配する水面形の計測方法は砕波時においては確立されておらず、そのことが砕波の性質を解明することを困難にしている。

一般的に水路での水面形の計測には波高計が用いられている。しかし、大量の気泡や砂が混入する砕波時において、波高計は使用することができない。また、従来のような2次元的な計測方法では、複雑で3次元的な広がりを見せる砕波時の水面形を十分に計測することはできない。そこで、従来までとは異なる方法で水面形を3次元的に計測する技術が必要とされている。

本研究では画像解析による水面形の計測システムの開発を目標としている。通常、物体の3次元的な形状をカメラにより計測する場合、二つ以上の方向から同時にカメラで撮影を行うことが必要であるが、そのように複数のカメラで撮影した画像を扱う場合、複数の画像内で同一の点を見つける必要がある。しかし、砕波のような複雑で細かい形状のもので、一致点を見つけることは難しく、大量の計算を要する。そこで、プロジェクターから座標画像を計測対象に投影し、それをカメラで撮影することで、視軸に沿う奥行き方向の座標を与え三次元物体の形状認識を行うアルゴリズムを提案し、その精度を検証することが本研究の目的である。

2. 計測原理

計測対象のカメラへの投影を、ピンホールモデルにより考える(図-1参照)。このとき、対象上の一点Mの実座標 (x_m, y_m, z_m) とそれを投影した点M'の画像座標 (x', y', f_c) の間には次のような関係がある。 f_c はカメラの焦点距離である。

$$x' = f_c \frac{x_m}{z_m}, y' = f_c \frac{y_m}{z_m} \quad (1)$$

これはカメラを原点とした相対座標による表記であり、この式をベクトル表記すると次のようになる。

$$\overrightarrow{O_c M'} = \frac{f_c}{O_c M \cdot k_c} \overrightarrow{O_c M} \quad (2)$$

同様に計測対象にプロジェクターから光を当てる場合、投影画像となる平面(プロジェクター座標平面)の点N'とそれを対象に投影した点Nの間にも次のような関係を得ることができる。

$$\overrightarrow{O_p N'} = \frac{f_p}{O_p N \cdot k_p} \overrightarrow{O_p N} \quad (3)$$

ここで f_p はプロジェクターの焦点距離である。上式(2)、(3)を対象上の同一の点に対して用いることで、その点の実座標(ワールド座標系)を求めることができる。

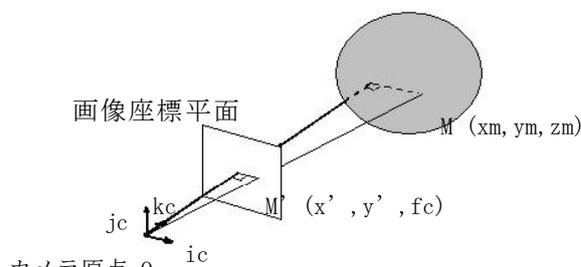


図-1 カメラ撮影のピンホールモデル

3. 実験方法、実験条件

本実験では、プロジェクター(Casio XJ560)によりチェッカーボードを計測対象に投影したものをデジタルカメラ(Casio EXILIM EX-F1)で撮影し(図-2)、その画像の解析により対象物の形状の計測を行った。チェッカーボードは通常の白黒の2色ではなく、赤・緑・青・マゼンタ(赤と青の混合色)・シアン(緑と青の混合色)の5色で色分けし、各色の境界を明確にするため、黒い線を入れた(図-3)。プロジェクターへの投影画像の入力はパーソナルコンピュータにより行った。プロジェクターの正面に計測対象を設置した場合プロジェクターの光源の強い光が計測対象で反射し撮影画像中に写りこんでしまうため、計測対象はプロジェクターより10 cm程度上方に設置し、光源からの強い反射光の写り込みを避けた。なお、計測対象後方には黒色の板を立て、画像の背景を黒くしている。カメラの解像度は 480×640 ピクセルとし、シャッタースピードは $1/30$ secとした。

計測は、本研究の目標である砕波水面形状計測に先立って、その形状が既知であるコンクリートの直方体ブロック(幅10 cm×奥行き6 cm×高さ20 cm)および水を入れたペットボトル(500ml)を対象とした。コンクリートのブロックの周りには白い紙を貼り付け、また、ペットボトルは500mlの物を用い、ペットボトルに入れる水は市販の入浴剤により白く着色することで反射率を増加させた。

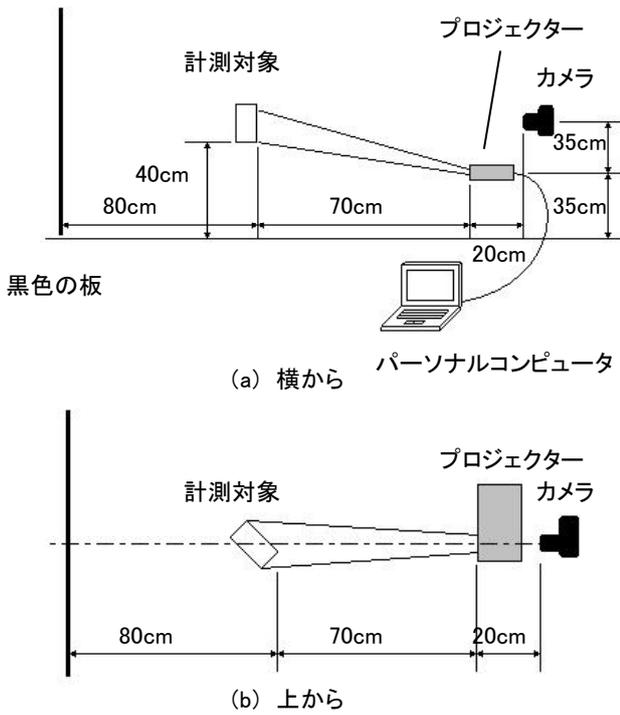


図-2 実験装置

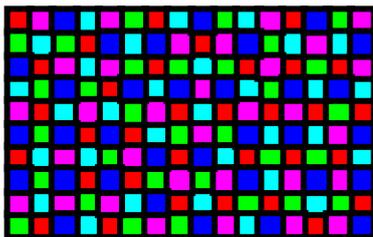


図-3 チェッカーボード(赤、緑、青、マゼンタ、シアン)

4. 解析方法

出力するチェッカーボードの各色のブロックの重心はプロジェクター座標が分かっているため、計算が可能である。そのため、各ブロックの重心の画像座標を得ることで、2章で述べたように、そのブロックのワールド座標を計算することが可能となる。これは、(1)撮影した画像中でチェッカーボードの色のブロックを識別し、(2)その後その重心を計算する2つの過程から行われる。また、隣接するブロックの色のパターンにより撮影画像中のブロックと投影画像中のブロックの同一化が可能となる。

4.1 画像中の色の識別と重心の決定

色は人間の知覚によるものであり、各個人により色の見え方には差が生じている。そのため、色を客観的に表すために様々な色の表示体系(表色系)が提案されており、多くの表色系で色が空間的に表現されている。その中で人間の色覚に近いとされ、多くの分野で利用されている表色系として、L*a*b*表色系というものが知られている(図-4(a))。これは明るさを表すL*、緑-赤方向の色合いa*、青-黄方向の色合いb*によって色を表すもので、この表色系では、人間の感じる色の違い(色差)がその2色間の色空間における距離と対応しており、距離が等しい色の間の色差は空間上のどの点においても等しい。

撮影画像中のチェッカーボード内の各色は、対象としている物体での反射やカメラの撮影を通して、出力したチェッカー

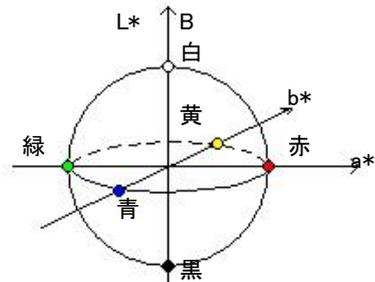
ボードと一般に異なっている。画像上の各ピクセルの色は、R、G、B という3つの値によって表現されている。これは赤、緑、青を3原色とし、その組み合わせで色を表現したものであり、RGB表色系と呼ばれる(図-4(b))。しかし、この表色系では色差が色空間における距離と対応しておらず、色の違いを識別する処理には向いていない。そこで、RGB表色系からL*a*b*表色系への変換を行い、L*a*b*表色系により各ピクセルの色の識別を行う。

RGB表色系からL*a*b*表色系への変換は、RGB表色系をXYZ表色系へと変換し、XYZ表色系をL*a*b*表色系に変換することで行う。表色系の変換を行った後、各ピクセルの色とチェッカーボードに使用される各色の色空間における距離を計算する。本解析では赤、緑、青、マゼンタ、シアン、黒のL*a*b*値として、画像内でそれぞれの色に対して指定したサンプル領域内のL*a*b*の値の平均値により識別を行う。各ピクセルの色のチェッカーボードの各色との距離dは次様に表せる。

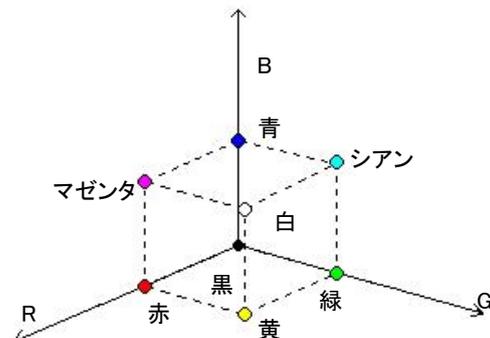
$$d = \sqrt{(L_p - L_c)^2 + (a_p - a_c)^2 + (b_p - b_c)^2} \quad (4)$$

ここで、L_p、a_p、b_pはそれぞれ各ピクセルでのL*、a*、b*であり、L_c、a_c、b_cは対象の色のL*、a*、b*である。距離dが小さいほど色差が小さくよりその色に近いとため、dが最小となる色をそのピクセルの色として決定する。

重心は識別した各色の連結ピクセル群に対してサブピクセル精度で決定した。色の誤識別により過剰ピクセルが取得された場合はこれを無視した。



(a) L*a*b*表色系



(b) RGB表色系

図-4 L*a*b*表色系とRGB表色系

4.2 キャリブレーション

2章で述べた原理により撮影画像から画像中の各点のワールド座標系を求めするためには、ワールド座標系におけるカメラ原点O_cおよびプロジェクター原点O_pの座標、カメラ座標における単位ベクトルi_c、j_c、k_c、プロジェクター座標における単位ベクトルi_p、j_p、k_pが既知である必要がある。それらの値を計算するため、ワールド座標系でz=0平面上のグリッドおよびそのグリッドをz方向にzずらしたものの撮影を行う。また、それぞれの位置でグリッドに対しプロジェクターからチェッカーボードを投影し、カメラ画像座標、プロジェクター座標、

実座標との関係を前述のピンホールモデルをベースに取得する。これらの画像から $0c, ic, jc, kc, 0p, ip, jp, kp$ を計算する方法は以下に示す。

$z=0$ において、プロジェクターの視軸がグリッドと交わる点をワールド座標系の原点 O と定義する(図-5)。 $z=z'$ のグリッドと視軸の交差する点を O' とすると、 O' は視軸 $0p0$ 上にあるのでプロジェクターの視軸方向単位ベクトル kp はベクトル $0'O$ を正規化することで得られる。また、 $z=0$ において Mn 点に投影されるチェッカーボードのブロックが $z=z'$ のグリッドに投影される点を Nn とすると、 Op は直線 $MnNn$ と $0'O$ の交点として得られる。誤差を小さくするため、計測領域周辺の複数の Mn, Nn に対し計算を行い、その平均を Op の座標とする。

次に、グリッドを撮影した画像の中心の実座標がカメラの視軸とグリッドの交点のワールド座標となり、 $z=0$ における交点を $0''$ 、 $z=z'$ における交点を $0'''$ とするとカメラの視軸方向単位ベクトル kc はベクトル $0''0'''$ を正規化することで得られる。 $z=0$ と $z=z'$ の両方の画像で同一ピクセル上にある点をそれぞれ Mn', Nn' とすると、 $0c$ は直線 $Mn'Nn'$ と $0''0'''$ の交点として得られる。こちらも誤差を小さくするため8組の Mn', Nn' に対し計算を行い、その平均を $0c$ の座標とした。

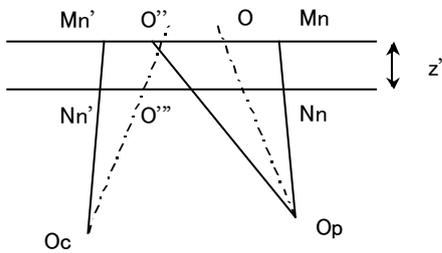


図-5 キャリブレーション

以上により $Op, kp, 0c, kc$ を求めることができる。次に式(2)から、以下のような関係が得られる。

$$x_n' = P_{nx} x_{ci} + P_{ny} y_{ci} + P_{nz} z_{ci} \quad (5), (6)$$

$$y_n' = P_{nx} x_{cj} + P_{ny} y_{cj} + P_{nz} z_{cj}$$

ここで、

$$(P_{nx}, P_{ny}, P_{nz}) = \frac{f_z}{(OM_n - OO_c) \cdot k_c} (OM_n - OO_c)$$

$$\vec{i}_c = [x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}], \vec{j}_c = [x_{cj}, y_{cj}, z_{cj}] \text{ である。}$$

式(5)および(6)の右辺を左辺へ移項し、そのときの左辺の値 δ の和が最小になるように ic および jc を求めると、 ic, jc は次式の解となり、これを overdetermined matrix system で解き、 ic および jc を得る。

$$TA = B$$

$$T = \begin{pmatrix} \sum P_{nx}^2 & \sum P_{nx} P_{ny} & \sum P_{nx} P_{nz} \\ \sum P_{nx} P_{ny} & \sum P_{ny}^2 & \sum P_{ny} P_{nz} \\ \sum P_{nx} P_{nz} & \sum P_{ny} P_{nz} & \sum P_{nz}^2 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} x_{ci} & x_{cj} \\ y_{ci} & y_{cj} \\ z_{ci} & z_{cj} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \sum x_n' P_{nx} & \sum y_n' P_{nx} \\ \sum x_n' P_{ny} & \sum y_n' P_{ny} \\ \sum x_n' P_{nz} & \sum y_n' P_{nz} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

同様に式(3)から ip, jp を導くことができる。

5. 数値テスト

本手法を実際に3次元物体の計測に用いる前に、数値モデルによる検証を行った。検証では、(1)プロジェクター座標を与えワールド座標および画像座標を計算、(2)計算結果として得られるワールド座標および画像座標を用いたキャリブレーション、(3)キャリブレーション結果および画像座標・プロ

ジェクター座標を用いた各点のワールド座標の計算、の順に行った。投影の対象は簡単のため $z=0$ の平面を用いた。

5.1 ワールド座標及び画像座標の計算

プロジェクター位置及びカメラ位置、焦点距離をあたえ、また、プロジェクター及びカメラの視軸はワールド座標の原点を通るものとする。図-6 はカメラ位置 $0c$ を $(-1, 0, -10)$ 、プロジェクター位置を $(10, 0, -10)$ 、焦点距離はともに1として、ワールド座標及び画像座標への投影を計算したものである。

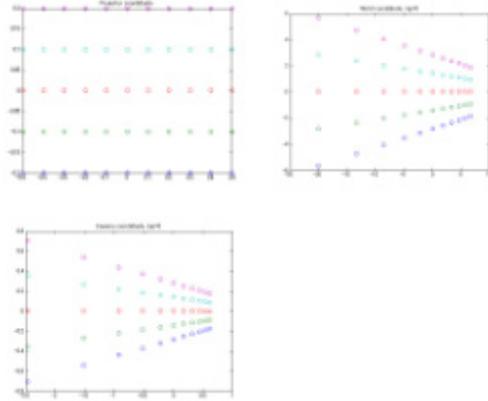


図-6 数値モデルにおけるワールド座標及び画像座標への投影

5.2 キャリブレーション

カメラ位置及びプロジェクター位置は固定した状態で $z=-1$ の平面に投影した場合におけるワールド座標を計算しておき、プロジェクターのキャリブレーションを計算した2つのワールド座標からプロジェクターのキャリブレーションを行う。

また、カメラのキャリブレーションはワールド座標上 $z=0$ の平面上のグリッドのカメラ座標への投影を計算し、そのカメラ座標と同じカメラ座標になる $z=-1$ の平面からの投影を与える $z=-1$ 平面上のグリッドを計算しておき、その座標及び $z=0$ の平面上のワールド座標からキャリブレーションを行う。

5.3 ワールド座標の再現

キャリブレーションにより得た値とプロジェクター座標および画像座標から、ワールド座標の計算を行う。式(2)及び式(3)からワールド座標 (x_n, y_n, z_n) に対する連立方程式を立てそれを行列であらわすと次のようになる。

$$TA = B$$

$$T = \begin{pmatrix} x_n^p * k_x^p - f^p i_x^p & x_n^p * k_y^p - f^p i_y^p & x_n^p * k_z^p - f^p i_z^p \\ y_n^p * k_x^p - f^p j_x^p & y_n^p * k_y^p - f^p j_y^p & y_n^p * k_z^p - f^p j_z^p \\ x_n^c * k_x^c - f^c i_x^c & x_n^c * k_y^c - f^c i_y^c & x_n^c * k_z^c - f^c i_z^c \\ y_n^c * k_x^c - f^c j_x^c & y_n^c * k_y^c - f^c j_y^c & y_n^c * k_z^c - f^c j_z^c \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} x_n^p (x_0^p k_x^p + y_0^p k_y^p + z_0^p k_z^p) - f^p (x_0^p i_x^p + y_0^p i_y^p + z_0^p i_z^p) \\ y_n^p (x_0^p k_x^p + y_0^p k_y^p + z_0^p k_z^p) - f^p (x_0^p j_x^p + y_0^p j_y^p + z_0^p j_z^p) \\ x_n^c (x_0^c k_x^c + y_0^c k_y^c + z_0^c k_z^c) - f^c (x_0^c i_x^c + y_0^c i_y^c + z_0^c i_z^c) \\ y_n^c (x_0^c k_x^c + y_0^c k_y^c + z_0^c k_z^c) - f^c (x_0^c j_x^c + y_0^c j_y^c + z_0^c j_z^c) \end{pmatrix}$$

計算結果は次のようになった。

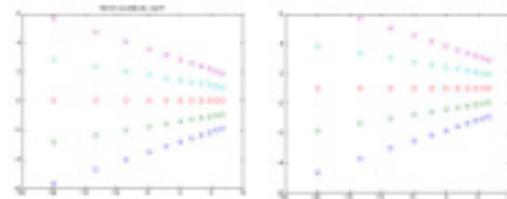
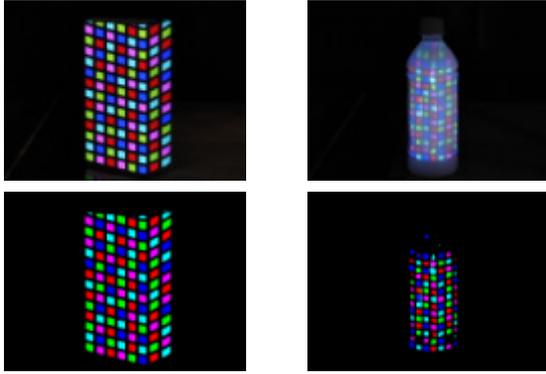


図-7 ワールド座標の再現(左は元の図)

6. 物理テスト

実験により撮影した画像に対し、4章で述べた解析方法により解析を行った。撮影された画像および画像中の色を識別したものを図-8に示す。



(a) 直方体ブロック (b) ペットボトル

図-8 撮影画像(上)および色の識別結果(下)

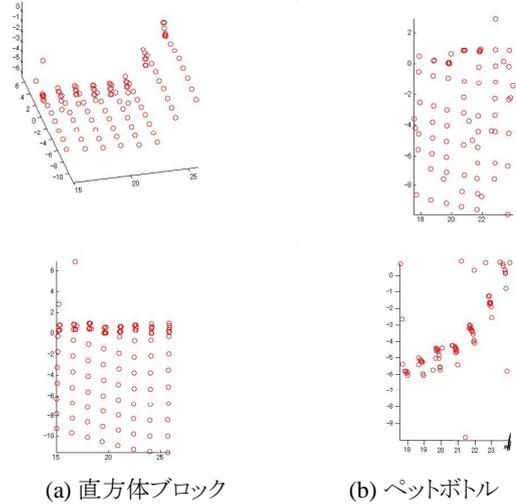
キャリブレーションの結果は次のようになった。単位は cm である。

$f_c=2316$
 $i_c=(0.9988, -0.0146, 0.0464)$
 $j_c=(-0.0081, 0.9844, 0.1757)$
 $k_c=(-0.0483, -0.1759, 0.9832)$
 $O_c=(5.2830, 20.3667, -124.6968)$
 $f_p=56.1438$
 $i_p=(0.9985, -0.0533, 0.0117)$
 $k_p=(-0.0035, 0.1761, 0.9844)$
 $O_p=(0.3106, -15.8368, -88.5002)$

i_c と j_c の内積が -0.0143 、 i_p と j_p の内積が -0.0568 となり、厳密に直角にはなっていないが、十分に小さい誤差と考えられる。計測結果は次章に示す。

7. 結果

解析結果は図-9 のようになった。直方体ブロック、ペットボトルともに大まかな形状を再構築すると共に物体のスケールもほぼ実際のスケールと同程度の3次元座標を構築可能である。しかし、部分的に顕著な誤差が確認されており、今後の高精度化が必要である。



(a) 直方体ブロック (b) ペットボトル

図-9 解析結果

8. まとめ

今回の実験では十分に精度の高い計測結果は得られていないが、物体の3次元形状のおおむねの形をとることができたため、計測方法として今後の精度の向上によって十分に実用可能になる可能性があると考えられる。

本計測法により、現在までその3次元形状の取得が困難であった自然界の物体について、容易に形状構築が可能となり、工学的に有用である。