粒子追跡法を利用した画像波高計の開発

神戸大学工学部　フェロー　道奥　康治
日本上下水道設計株式会社　学生員　森田　耕平
近畿大学理工学部　正会員　竹原　幸生

1. 研究背景

水工学では，河床地形や水面形の二次元分布を時々刻々計測する必要性がしばしばある．現実には probe 式 sensor による点計測が一般的であり，水面・河床面の二次元分布の経時変化計測は困難である．点計測により平面二次元の情報を得るためには，多量のセンサーと大容量データロガーが必要とあり，個々のセンサーの同期も課題である．点計測の多数回繰り返しによる計測では，現象の再現性が制約条件となる．そのため，二次元界面形状を瞬時に計測できる技術システムの開発が必要である．本研究では画像処理技術を活用して河床面や水面の二次元形状の経時変化を追跡できる新たな計測システムの開発した．

2. 計測手法

(1) 概要

図-1 に示すように，光源から投射された光線の水面上の投影点 A_{ij} が水面変動とともに移動する様子を CCD カメラで連続撮影する．連続画像上に写る投影点 a_{ij} の画像座標 (x_{aij},y_{aij}) を粒子追跡法 [1)] で連続的に求め，(x_{aij},y_{aij}) からカメラ位置と投射光線の式を用いた幾何学計算を経て A_{ij} の実空間座標 $(X_{Aij},Y_{Aij},Z_{Aij})$ が得られる（添え字 i はスキャンにより移動する時々刻々の位置を示し，j は光線の番号を示す）．

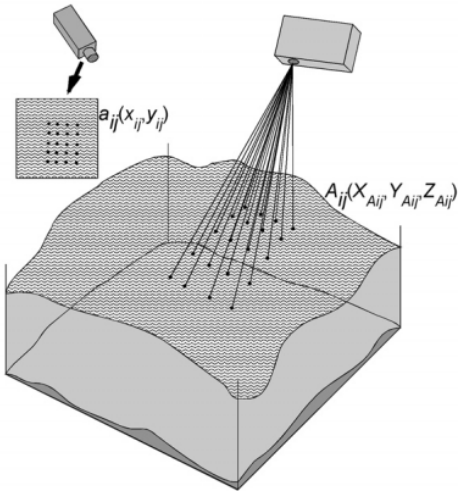

図-1　計測概要

(2) 幾何計算過程

粒子追跡法で算出した写真像 a_{ij} の画像座標 (x_{aij},y_{aij}) と［カメラ座標系⇔実空間座標系］の座標変換式から，写真像 a_{ij} の実空間座標 $(X_{aij}, Y_{aij}, Z_{aij})$ を求める．**図-2** からわかるように A_{ij} は，a_{ij} とカメラ中心位置 C を結んだカメラ光軸直線 Ca_{ij} と光源からの光線 L_j の交点である．a_{ij} の実空間座標 $(X_{aij}, Y_{aij}, Z_{aij})$ とカメラ中心位置座標 (X_C, Y_C, Z_C) からカメラ光軸直線 Ca_{ij} の式を算出し，光線 L_j の式と連立させて解けば，水面上の投影点 A_{ij} の実空間座標 $(X_{Aij},Y_{Aij},Z_{Aij})$ が求められる．

ここでカメラ中心位置 C の実空間座標 (X_C, Y_C, Z_C) と，（カメラ座標系⇔実空間座標系）の座標変換式はカメラ・キャリブレーションにより求められ，光源からの光線 L_j の式はプロジェクター・キャリブレーションから求められる．

また 3 次元幾何であることから，直線 Ca_{ij} と直線 L_j の交点 $(X_{Aij},Y_{Aij},Z_{Aij})$ を求める際, 2 直線の交点として求めるのではなく, 2 直線の最短距離を結ぶ線分の中点として求めた．

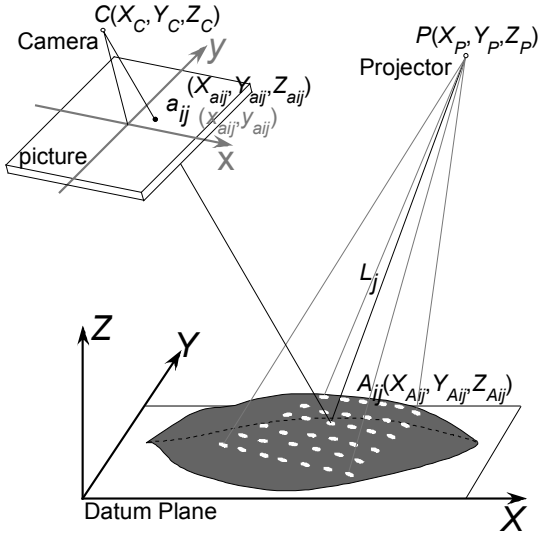

図-2 水面上投影点 A_{ij} の幾何

キーワード：カメラ・キャリブレーション，プロジェクター・キャリブレーション，粒子追跡法
連絡先：〒657-8501　神戸市灘区六甲台町１－１　Phone: (078)803-6056, FAX: (078)803-6069

3. キャリブレーション

カメラ・キャリブレーションにはステレオ計測法 [2)]などで用いられる方法を用いた．

プロジェクター・キャリブレーションでは，光源から投射されている光線の式(1)を求める．本計測手法で用いる光源では各光線のなす角度が一定であるため，隣り合う光線の内積より回帰式(2)を作成し，基準平面（Z=0）上の投影点座標(X_{Bjk},Y_{Bjk},0)から(1)式中の未知数(X_P,Y_P,Z_P)を最小二乗法で求める．（**図-3** 参照）

$$\frac{X-X_P}{l_j}=\frac{Y-Y_P}{m_j}=\frac{Z-Z_P}{n_j} \tag{1}$$

$$\left(l_j\cdot l_{j+1}+m_j\cdot m_{j+1}+n_j\cdot n_{j+1}\right) = \sqrt{l_j^{\,2}+m_j^{\,2}+n_j^{\,2}}\cdot\sqrt{l_{j+1}^{\,2}+m_{j+1}^{\,2}+n_{j+1}^{\,2}}\cdot\cos\theta \tag{2}$$

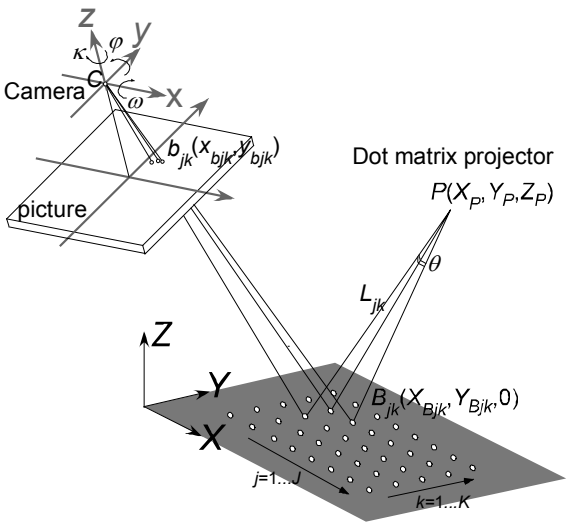

図-3 プロジェクター・キャリブレーション

4. 計測結果

本計測手法により一次元水面波を計測した．**図-4** のような二次元水面形状の時系列が時間遅れなく得られる．**図-5** に横断方向波高の経時変化を示す．静止水面状態から振幅が増加し，波が発達する様子が確認される．横断方向の位相が同一時間軸上で一致しており，一次元波が良好に計測されている．**図-6** に縦断方向の波高分布時系列（t=6～9(sec)）を示す．X=-10(cm)付近から X=9(cm)付近へ約 0.15(sec)後に伝播しているので，波速は約 1.27(m/sec)となり，造波装置で発生させた波の速度 1.25(m/sec)と一致することが確認された．

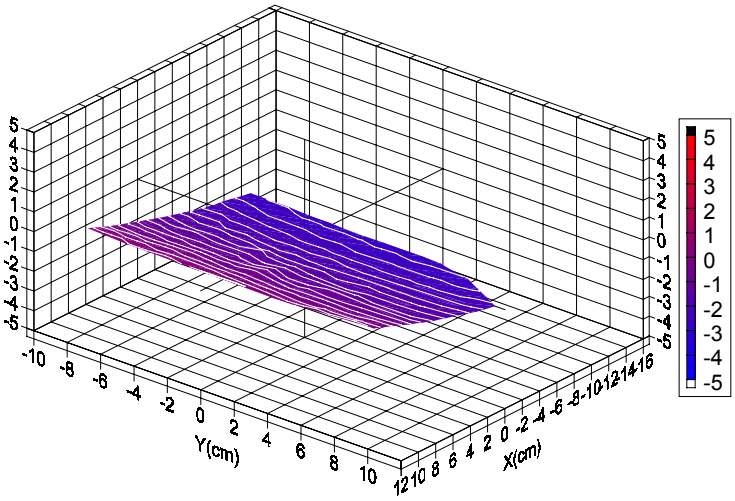

図-4 計測結果（*t*=9.0(sec)）

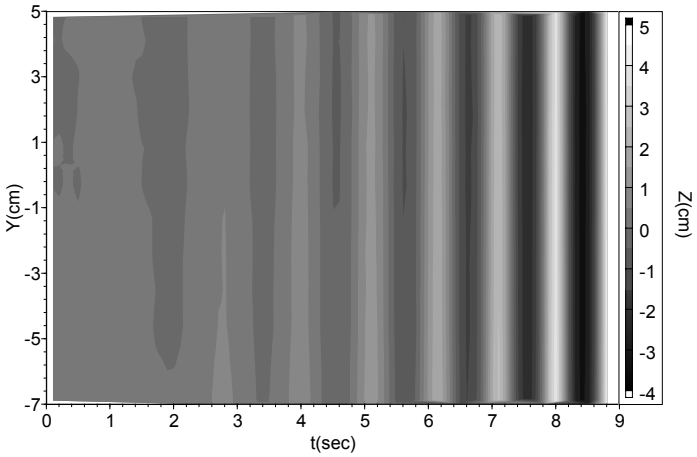

図-5 横断方向波高分布の時系列

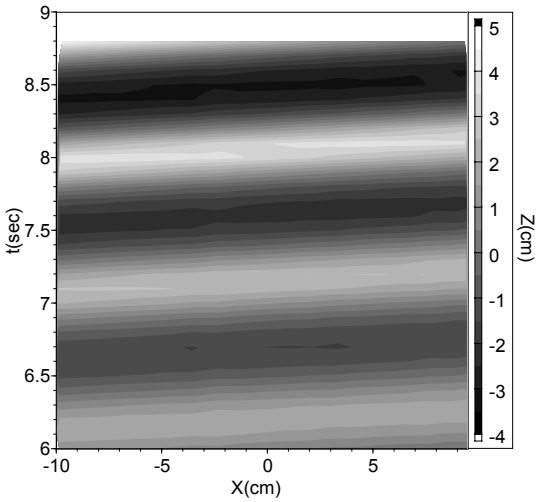

図-6 縦断方向波高分布の時系列 *t*=6～9(sec)

5. 参考文献

1) 竹原幸生，江藤剛治，村田滋，道奥康治：土木学会論文集 No.533/Ⅱ-34,107-126,1996,2

2) 椿太郎，藤田一郎：水工学論文集,第 48 巻,2004,3