

第II部門

PTVを用いた平面二次元地形計測システムの構築

神戸大学大学院 学生員 ○森田 耕平
 神戸大学工学部 フェロー 道奥 康治
 近畿大学理工学部 正会員 竹原 幸生

1. 研究背景

水工学においては、河床地形や水面の二次元形状を時々刻々に計測する必要性がしばしばある。現時点では、河床や水面は probe 式 sensor によって点計測で求められるため、水面や河床面などの二次元形状を時系列的に計測することはできない。点計測によって平面二次元の情報を得るためには、多量のセンサー個数と大容量のデータロガーが必要になる。また、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。以上のことを勘案すると、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を目的としている。

2. 計測手法

(1)概要

図-1に示すように液晶プロジェクターから測定対象地形に対し、点列が円周運動する動画を投射する。点群の円周運動の中心は、プロジェクターからの基軸光線として投射される点である。各点の投影光線は円錐形の軌跡を構成する。点の円周運動の動画を CCD カメラで連続撮影し、地形上に写る投影点 A_{ij} の実空間における座標 $(X_{A_{ij}}, Y_{A_{ij}}, Z_{A_{ij}})$ を、その写真像 a_{ij} の画像上の座標 $(x_{a_{ij}}, y_{a_{ij}})$ から求められることができれば、その地点での基準平面からの高さ（地形や水位）を求められる（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 は点番号を示す）。

(2)各座標系の定義

本研究に使用する3つの座標系を定義する（図-2参照）。一つ目は実空間の座標系 (X, Y, Z) である。基準平面を $Z=0$ と定義する。二つ目はカメラのレンズ中心 C を原点とするカメラ座標系 (x, y, z) である。実空間座標系におけるカメラ座標系の原点 C を (X_C, Y_C, Z_C) とする。また、カメラ座標系の x, y, z 軸をそれぞれの方向に $(\omega, \varphi, \kappa)$ だけ回転させると実空間座標系の各軸に一致するとする。三つ目の座標系はプロジェクター P を原点とする円錐座標系 (ξ, η, ζ) である。ここで、光線の回転軸が ζ 軸となるように座標系が定義される。円錐座標系の原点 P は実空間座標系で (X_P, Y_P, Z_P) と表記され、また座標軸 (ξ, η, ζ) をそれぞれの方向に (Ω, Φ, K) だけ回転させると実空間座標系に一致すると考える。

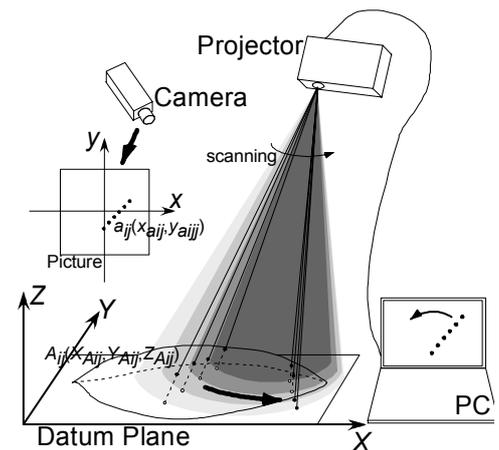


図-1 光線のスキャン

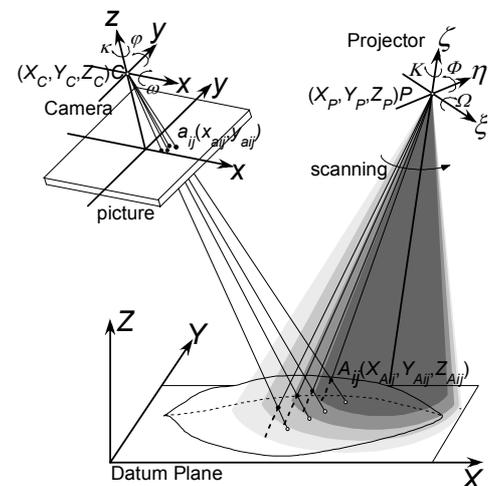


図-2 各座標系

(3)手順

投影点 A_{ij} の実空間座標 $(X_{Aij}, Y_{Aij}, Z_{Aij})$ を, 写真像 a_{ij} のカメラ座標系 (x_{aij}, y_{aij}) から求める方法を以下に示す.

まず, 時々刻々に移動する写真像 a_{ij} の座標 (x_{aij}, y_{aij}) は PTV¹⁾ によって計測・解析される. 次に写真像 a_{ij} の座標 (x_{aij}, y_{aij}) を基準平面上の点 T_{ij} の実空間座標 $(X_{Tij}, Y_{Tij}, 0)$ へ変換する. その際 (カメラ座標系 ⇄ 実空間座標系) 間の変換式を用いる. この変換式には $(X_C, Y_C, Z_C), (\omega, \varphi, \kappa)$ およびカメラの焦点距離 f がパラメータとして含まれる. これらは未知係数であるがカメラ・キャリブレーション²⁾を通して求められる.

次に, 求めようとする投影点 A_{ij} の実空間座標 $(X_{Aij}, Y_{Aij}, Z_{Aij})$ の幾何学的位置を図-3 から考察すると, A_{ij} は円錐面 E_j と直線 CT_{ij} の交点であることがわかる. 各点の移動によって形成される各円錐面 E_j の式を導出すれば, A_{ij} の実空間座標 $(X_{Aij}, Y_{Aij}, Z_{Aij})$ は円錐面 E_j の式と直線 CT_{ij} の式との連立方程式によって求められる. 円錐面 E_j の式は $(X_P, Y_P, Z_P), (\xi, \eta, \zeta)$ および円錐の頂角 α をパラメータとして記述される. これら円錐面に関する未知パラメータはプロジェクター・キャリブレーションから求められる.

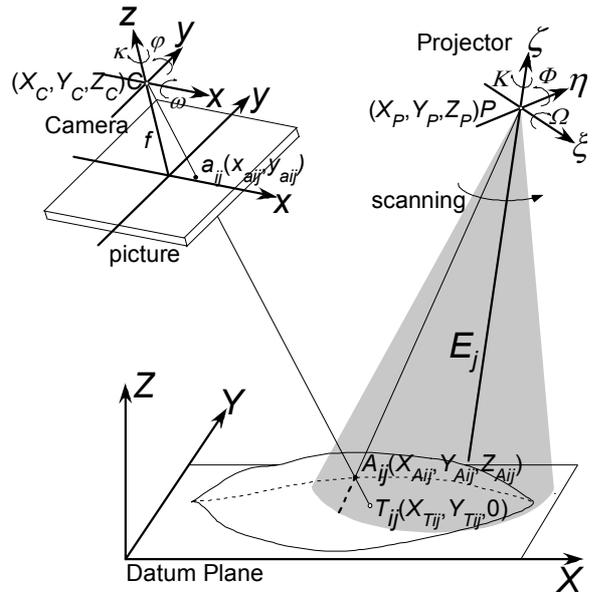


図-3 A_{ij} の幾何

3. キャリブレーション

本計測システムではカメラ・キャリブレーションとプロジェクター・キャリブレーションが必要である. ここでは紙面の都合上, プロジェクター・キャリブレーションのみについて示す.

実空間における円錐面 E_j の一般式は次式となる.

$$\{b_{11}(X-X_p)+b_{12}(Y-Y_p)+b_{13}(Z-Z_p)\}^2 + \{b_{21}(X-X_p)+b_{22}(Y-Y_p)+b_{23}(Z-Z_p)\}^2 = \beta \cdot j^2 \{b_{31}(X-X_p)+b_{32}(Y-Y_p)+b_{33}(Z-Z_p)\}^2 \quad (1)$$

(for $j=1 \dots J$)

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Omega & -\sin\Omega \\ 0 & \cos\Omega & \cos\Omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\Phi & 0 & \sin\Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Phi & 0 & \cos\Phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos K & -\sin K & 0 \\ \sin K & \cos K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

図-4 に示すように基準平面からの高さが既知である q 枚 ($q=1 \dots Q$) の平面を計測系に設置する. ここで, プロジェクターから各平面上に光線を投射し, 各平面上の投影点 B_{ijq} の実空間座標 $(X_{Bijq}, Y_{Bijq}, h_q)$ を得る. よって式(1), (2)中における未知係数 $(X_P, Y_P, Z_P, \xi, \eta, \zeta, \alpha)$ は, B_{ijq} を観測値として最小二乗法から求められる.

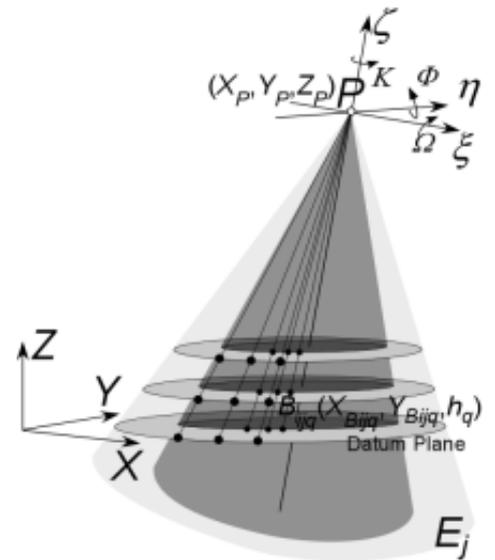


図-4 プロジェクター・キャリブレーション

4. 参考文献

- 1) 竹原幸生, 江藤剛治, 村田 滋, 道奥康治: PTV のための新アルゴリズムの開発, 土木学会論文集 No.533/II-34,107-126,1996,2
- 2) 椿 太郎, 藤田一郎: ステレオ画像を利用した自由水面の水位分布計測法の開発, 水工学論文集, 第 48 巻, 2004,3