

コンクリート 表面処理面の粗度測定のための三次元計測装置の開発の開発

長崎大学工学部 学生員 ○ 和田眞禎 正会員 松田浩
長崎大学工学部 非会員 森山雅雄 山本晃 杉原 太郎

1 はじめに

コンクリート構造物の補修・補強では、まずコンクリート表面をはつり、補修・補強後は、その面にコンクリートを打設し、コンクリート硬化後は一体とした構造とする必要がある。そのため、コンクリート表面はショットブラストなどの表面処理機械を用いて凹凸状の表面処理が行われている。

しかしながら、表面処理面がどの程度の凹凸状態であれば、打設コンクリートとの付着が十分であるかは、経験的に行われているのが現状である。コンクリート処理面と打設コンクリートとの付着特性は付着せん断試験を行うことにより把握することができるが、表面粗度の定量化法は確立されていない。建設現場において表面粗度を計測するためには、対象構造物の位置、向きなどの制限から、実験室レベルでのような接触型の計測装置は不適である。以上に鑑み、本研究では、コンクリート表面処理面の凹凸状態を建設現場で定量的に評価するために、非接触で表面粗度を計測するための三次元計測システムの開発を目的としたものである。本計測システムは、測量学の三角測量の理論を基に、PCとCCDカメラとレーザーを用いた手軽かつ安価でユーザフレンドリーな小規模三次元計測システムである。本文では、本計測システムの計測の理論と現時点での研究状況についての報告を行う。

2 三次元計測の基礎理論

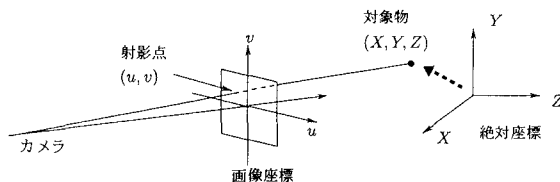


図1: 透視変換図

絶対座標 (X, Y, Z) 、画像座標 (u, v) として、両座標における透視変換図を図1に示す。及び、透視変換式は、写真測量で用いられている理論に基づいて、式(1)のように表される¹⁾。

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 C_{ij} は、物体の絶対座標を回転・平行移動して、カメラの画像座標 $((u, v)$ 座標) に変換する透視変換行列、 λ は定数である。係数行列 C_{ij} には、カメラの(対象物の絶対座標系に対する)位置と方向、レンズの焦点距離が含まれる。

式(1)から、定数 λ は、 $\lambda = C_{31}X + C_{32}Y + C_{33}Z + C_{34}$ で表され、それを上式(1)に代入すれば次式(2)を得る。

$$\begin{bmatrix} C_{11} - C_{31}u & C_{12} - C_{32}u & C_{13} - C_{33}u \\ C_{21} - C_{31}v & C_{22} - C_{32}v & C_{23} - C_{33}v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{34}u - C_{14} \\ C_{34}v - C_{24} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ステレオ画像法では2台のカメラで同一点 (X, Y, Z) を撮影する。その際、左側のカメラ(カメラパラメータ: L)の画像には、画像座標値 (u_L, v_L) に、右側のカメラ(カメラパラメータ: R)の画像には、画像座標値 (u_R, v_R) に、 (X, Y, Z) 点が射影される。カメラにより撮影された画像座標値を式(2)に代入し、次式(3)が得られる。

$$\begin{bmatrix} L_{11} - L_{31}u_L & L_{12} - L_{32}u_L & L_{13} - L_{33}u_L \\ L_{21} - L_{31}v_L & L_{22} - L_{32}v_L & L_{23} - L_{33}v_L \\ R_{11} - R_{31}u_R & R_{12} - R_{32}u_R & R_{13} - R_{33}u_R \\ R_{21} - R_{31}v_R & R_{22} - R_{32}v_R & R_{23} - R_{33}v_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{34}u_L - L_{14} \\ L_{34}v_L - L_{24} \\ R_{34}u_R - R_{14} \\ R_{34}v_R - R_{24} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)を $PX = U$ と表せば、求めるべき解(三次元座標) X は、 $X = (P^t P)^{-1} P^t U$ で求められる。式(3)の P は、正方行列ではないので、 P の転置をかけて、 $P^t P$ の逆行列を使用している。ここで、上付き添え字 t は転置を表す。式(3)はカメラに撮影された画像座標値が既知であれば、絶対座標での (X, Y, Z) が算定できることがわかる。

式(2)をCについて変形すると、次式(4)を得る。

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Xu & -Yu & -Zu \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -Xv & -Yv & -Zv \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ \vdots \\ C_{32} \\ C_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (4)$$

さらに、既知選点の座標値 $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), \dots, (X_n, Y_n, Z_n)$ を式(4)に代入すると、次式(5)が得られる。

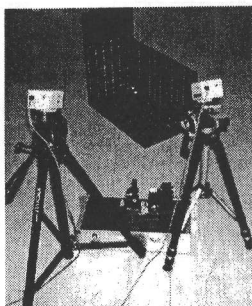
$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1 u_1 & -Y_1 u_1 & -Z_1 u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1 v_1 & -Y_1 v_1 & -Z_1 v_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_n u_n & -Y_n u_n & -Z_n u_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -X_n v_n & -Y_n v_n & -Z_n v_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ \vdots \\ C_{32} \\ C_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(4)には、未知係数 C_{ij} が11個含まれるが、これは基準となる点を代入することで算定することができる。式(4)では各点2個の式が作れるので、6個以上とる必要がある。

3 三次元計測装置の製作、計測例および考察

① 既知座標値(基準点)の計測、② カメラキャリブレーション(変換係数行列)、③ 対象物の3次元座標値の計測、を容易にかつ短時間に測定できる装置を製作した。計測システムを概観を写真1に示す。本計測システムを用いて、写真2のように表面処理を施したコンクリート表面を計測した。図2は測定した計測結果を画像処理して表示したものである。本計測での誤差は最大0.5mmである。現在までのところ2台のカメラを使用しているが、さらなる高精度化を追求するために3台のカメラを用いた計測システムを製作予定である。また、カメラレンズのひずみ補正を行うと精度もさらに向上するものと考えられるので、現在そのプログラムを開発中である。なお、計測時間は、キャリブレーションに5分程度、スリットレーザー計測で最大10分程度で行うことができる。本システムのレーザー光線は、ある角度の範囲内であれば任意に掃射でき、またスリット計測のみならずスポット計測も行いうることができる。

本計測装置の問題点として、① キャリブレーションボード、デスクトップPCを使用しているので可搬性が悪い、② 現在使用しているレーザー光線では、明るい所では良好な計測データが得られない、③ 大規模構造物では測定が困難である、が挙げられる。これらの問題点は、キャリブレーションボードを使用しない計測法(現在開発中)、PCのTip化、強いレーザー光線を用いることで対処できると考えている。



計測装置概観



はつり面の写真



計測データの三次元画像化

4 あとがき

コンクリート表面の凹凸の三次元計測装置を製作し、パソコンで三次元画像化することに目途がたったので、今後は計測データを基に表面粗度の定量化、および打設コンクリートとの付着性状について研究を行っていく予定である。なお、本計測装置は3次元膜構造の形状測定を目的として開発途中にあるものをコンクリート表面粗度測定に転用したもので、能村膜構造技術振興財団からの研究助成を戴いたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1) 杉原太郎他:「小規模三次元計測システムの開発」(社)日本写真測量学会 平成10年度 発表論文集, 2) 井口征士・佐藤宏介:「三次元画像計測」昭晃堂1990年, 3) (社)日本写真測量学会・解析写真測量委員会:「解析写真測量」昭和58年