

画像による表面形状計測法の実用化検討

復建調査設計(株) 正会員 ○石田修一 広島大学大学院 正会員 藤井堅
 広島大学 学生会員 影山徹 広島大学大学院 フェロー会員 中村秀治

1. はじめに

近年、経年劣化を起こす構造物の増加に伴い、構造物の表面形状を簡易かつ精度よく測定する維持・管理技術の重要性が高まっている。その計測手法の一つに画像計測法があるが、実用化に向けた議論はあまりされておらず、実務に適用するためには使用性や精度など、まだ検討すべき点が残されている。本研究では、画像計測法を用いて実構造物の表面形状計測を行い、問題点や改善点を考慮し、画像計測の実用化を検討する。

2. 提案する画像計測方法

本論文で用いた画像計測方法は、図1に示すような片方のカメラの代わりにプロジェクターを用いる方法である。これによって、プロジェクターの光を利用して計測対象に多数の標点を投影し、液晶面上とカメラの画像面上の標点座標を決定すれば腐食表面を再現できる。

図1において、 α, β はそれぞれカメラとプロジェクターの視線方向角、 fL, fR はそれぞれカメラとプロジェクターの焦点距離である。 XL, YL, XR, YR はそれぞれカメラ画像面、プロジェクター液晶面上の距離である。以上を用いると、腐食表面上の点Dの3次元座標 (x, y, z) は次式で表される。

$$x = a \frac{\sin\{\beta + \tan^{-1}(XR/fR)\} \cos\{\alpha - \tan^{-1}(XL/fL)\}}{\sin[\pi - \{(\alpha - \tan^{-1}(XL/fL)) + (\beta + \tan^{-1}(XR/fR))\}]} \quad (1)$$

$$y = a \frac{\sin\{\beta + \tan^{-1}(XR/fR)\} \sin\left\{\tan^{-1}\left(\frac{YL}{\sqrt{fL^2 + XL^2}}\right)\right\}}{\sin[\pi - \{(\alpha - \tan^{-1}(XL/fL)) + (\beta + \tan^{-1}(XR/fR))\}]} \quad (2)$$

$$z = a \frac{\sin\{\beta + \tan^{-1}(XR/fR)\} \sin\{\alpha - \tan^{-1}(XL/fL)\}}{\sin[\pi - \{(\alpha - \tan^{-1}(XL/fL)) + (\beta + \tan^{-1}(XR/fR))\}]} \quad (3)$$

以上の式に含まれる $a, \alpha, \beta, fL, fR, XR, YR$ は既知であるので、カメラの画像面上での標点の座標 (XL, YL) を求めれば、腐食表面上の任意の点Dの3次元座標 (x, y, z) を求めることができる。

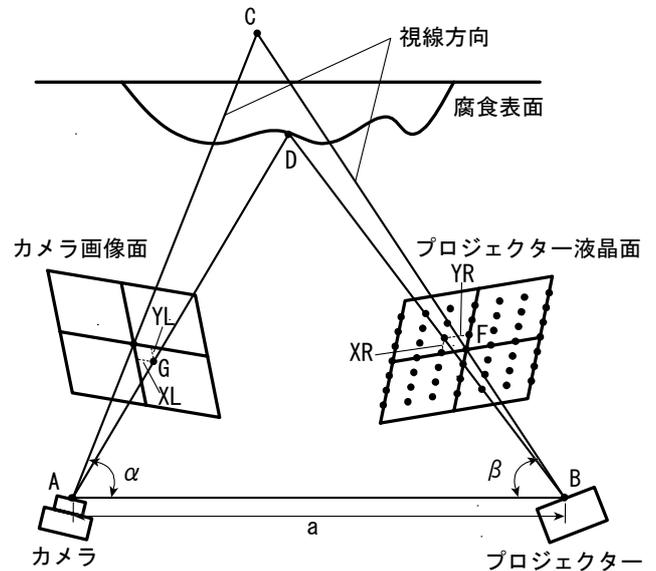


図1 プロジェクターを用いた画像計測

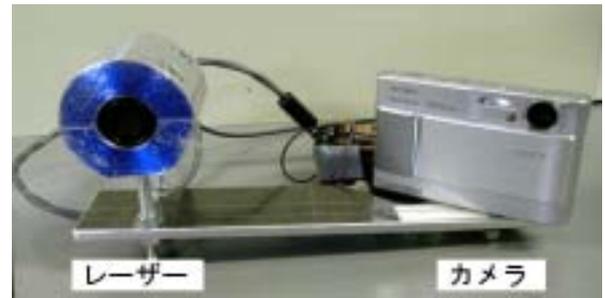


写真1 計測装置

3. 新しい計測装置の提案

本画像計測の実用化を検討するにあたり、カメラとプロジェクターが一体化した装置を作製し、屋外で既設鋼構造物の腐食表面の計測を行った。その結果、標点の認識がほとんどできず、計測が困難であることが分かった。また、操作性も悪く、実用的ではないことが判明した。

そこで、新しい標点の照射方法として、レーザーパターンプロジェクターを用いた標点の照射方法を考案した。レーザーから発せられる光は一本の光線であるが、スリットを入れることで分光させ、標点をつくることができる。写真1にレーザーを用いて作製した計測装置を示す。

4. 画像計測結果と精度

3.で作製した計測装置を使って約100年供用されたリベットプレートガーダー橋のフランジ部を計測した例を示す。

図2の断面比較図は、Yが一定の線上でのXとZの関係を、作製した計測装置による計測結果と、三次元座標計測器による計測結果を比較して示している。

図2から、画像計測のほうが三次元座標計測よりも小さい値となっているが、その差は1mm未満であり、よく再現できていると言える。

5. 角度の真値の推定

3.で作製した計測装置について、 α, β の真値を推定する。 α, β を未知の独立パラメーターとすると、腐食表面形状計測における奥行き方向zは、

$$z = Z(\alpha, \beta) \quad (8)$$

と表される。角度の真値 α, β を得るために必要な、初期推定値を α_0, β_0 、補正量を $\delta\alpha, \delta\beta$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 + \delta\alpha \\ \beta &= \beta_0 + \delta\beta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

の関係がある。計算誤差を R_i 、真の誤差を r_i とすると、

$$r_i \approx R_i + \frac{\partial Z_i}{\partial \alpha} \delta\alpha + \frac{\partial Z_i}{\partial \beta} \delta\beta \quad (10)$$

と表される。次に、式(10)を使って、真の誤差 r_i の平方和 Q を最小にするような真値 α, β を、推定値 α_0, β_0 から計算する。まず、 Q は次のように定義される。

$$Q = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n \left[R_i + \frac{\partial Z_i}{\partial \alpha} \delta\alpha + \frac{\partial Z_i}{\partial \beta} \delta\beta \right]^2 \quad (11)$$

この値 Q は $\delta\alpha, \delta\beta$ に関するすべての偏微分係数が同時に0になるとき、最小値をとる。よって式(11)を $\delta\alpha, \delta\beta$ で偏微分し、整理すると次の正規方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Z_i}{\partial \alpha} \right)^2 & \sum_{i=1}^n \frac{\partial Z_i}{\partial \alpha} \frac{\partial Z_i}{\partial \beta} \\ \sum_{i=1}^n \frac{\partial Z_i}{\partial \beta} \frac{\partial Z_i}{\partial \alpha} & \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Z_i}{\partial \beta} \right)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\alpha \\ \delta\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^n \frac{\partial Z_i}{\partial \alpha} R_i \\ -\sum_{i=1}^n \frac{\partial Z_i}{\partial \beta} R_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)を解いて、もし $\delta\alpha, \delta\beta$ が大きければ、 α_0, β_0 を $\alpha_0 + \delta\alpha, \beta_0 + \delta\beta$ に置き換えて、収束するまで計算を繰り返せばよい。

三次元座標計測器で計測した値を真値として、4.で $\alpha_0 = 54^\circ, \beta_0 = 90^\circ$ として画像計測をした値に対し、式(12)を適用すると、本計測装置の真値 $\alpha = 53.395^\circ, \beta = 91.020^\circ$ が得られた。この真値を式(1)~(3)に代入して三次元座標を算出し、4.と同様に示した断面比較図を図3に示す。

図2と図3を比較すると、最大1mmであった誤

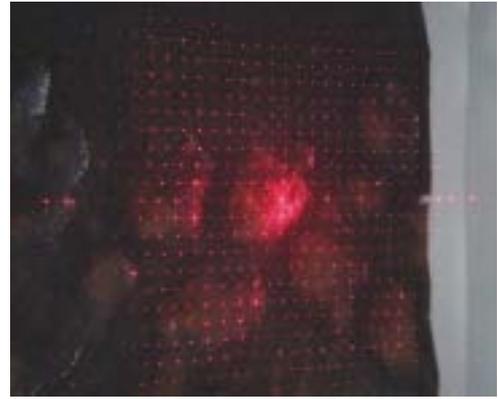


写真2 標点を照射したフランジ面

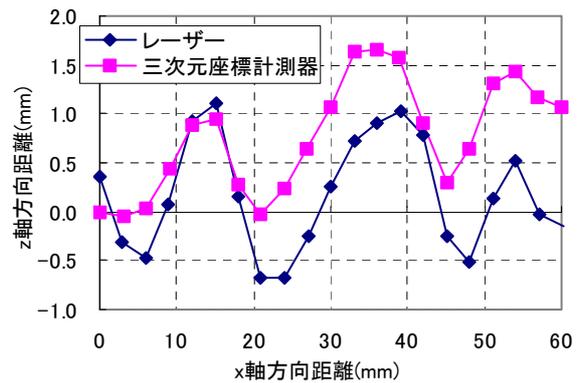


図2 断面比較図

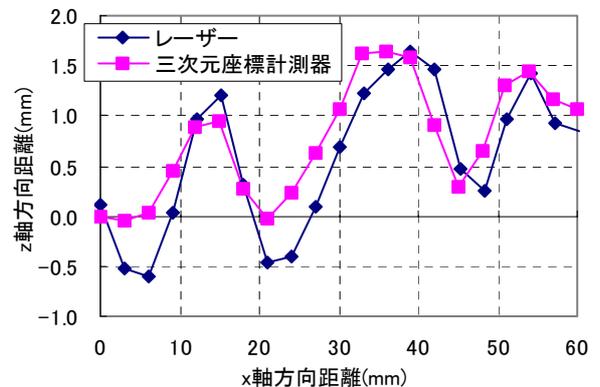


図3 断面比較図(α, β 補正後)

差が0.5mm程度と小さくなっているのが分かる。

6. 結論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 標点の投影に、プロジェクターの代わりにレーザーを用いることで計測装置の小型化、軽量化が可能になった。
- (2) カメラとレーザーを一体化させた計測装置を製作し、計測装置の角度の真値を推定して、誤差の影響を少なくした。

参考文献

中村秀治・藤井堅・松下陽三・浅海敬次: 標点投影による画像計測法と維持管理のための腐食表面計測への適用について, 土木学会論文集, 2006