岡山大学大学院 環境生命科学研究科 学生会員 ○壷阪知広
岡山大学大学院 環境生命科学研究科 正会員 西山哲
京都大学大学院 工学研究科 正会員 矢野隆夫
株式会社 開発設計コンサルタント 菊地輝行

2.2.1 共線条件式 3)4)

共線条件式について述べる. 共線条件とは, カメラの 原点(レンズ中心), 対象空間点(ターゲット), その画 像上の点は一直線上に存在するという条件である. **図2** -2 に共線条件のイメージを示す. この条件から共線条 件式が導かれる. この式において, 既知数は観測値(x,y) と対象座標点(X,Y,Z)と焦点距離-cであり, 未知数はカ メラ原点位置 (X_0, Y_0, Z_0), m_{ij} の中に含まれるカメラの 回転角(θ, φ, κ)の合計 6 個である. なお左辺の x, y は ひずみのない理想的なカメラで撮影した場合の写真座 標である.

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= -\mathbf{c} \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ \mathbf{y} &= -\mathbf{c} \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ &= \overline{\mathbf{x}}(2.1) \end{aligned}$$



図2-2 共線条件の概念

2.2.2 最小二乗法 5)

線形条件式は非線形であるため、これを初期値まわ りでテーラー展開し、行列表示する.

 v_0

$$+Ax = e_0 \qquad \qquad \vec{\mathbf{x}}(2.2)$$

この式が線形化された共線条件式である.これを最小 二乗法で解く.つまり,二乗誤差の総和を最小にするよ うな未知数を求める.

1. 序論

我が国では, 高度経済成長期に整備された土木構造 物が建設後既に 30 年~50 年の期間を経過し、老朽化 が進行しており, 適切な維持管理(点検など)を行うこと が重要な課題となっている. そこで土木構造物の新し い点検技術として、デジタル画像を用いたひび割れ幅 計測手法の開発が行われている.この技術は維持管理 をより効果的・安価に行うことができ,客観性,表現性, 簡易性に優れている¹⁾. この技術は近年開発が進んでい る調査・診断ロボットへも導入されているが、 デジタル 画像計測において,一般的にデジタル一眼レフカメラ を用いておりロボットへの導入を考えるとコンパクト, 軽量,安価なカメラが良い.本研究では,数種類のカメ ラを用いて室内実験を実施し、カメラによる精度の違 いを検証し、デジタル画像計測への影響を検証した.ま た,実際に供用中のトンネルの計測に適用し、その結果 から本手法の実用性を考察する.

2. デジタル画像計測の基本理論

2.1 計測の概要²⁾



図2-1 計測の様子

図 2-1 は計測の様子を示したものであり,以下に本 手法の計測の概要を述べる.本研究で用いるひび割れ 幅計測手法は,デジタルカメラで計測対象(反射ターゲ ット)を任意の位置,姿勢から撮影し,撮影画像をコン ピューターで解析してターゲット円上の重心間距離を 計測し,ひび割れの変位量を算出する. $\Phi(x) = \sum v^2 = v^T v = (e - Ax)^T (e - Ax) \rightarrow \min_{\exists (2.3)}$ これをxで偏微分して0と置くと正規方程式

$$(A^T A)x = A^T e$$
式(2.4)
を得る.以上より未知数の最確値 x は

 $x = (A^T A)^{-1} A^T e \qquad \qquad \vec{\mathbf{x}}(2.5)$

として得られる.

2.3 ターゲット円の重心計算¹⁾

デジタル画像計測を高精度にするには、唯一の観測 値であるターゲット円の 2 次元座標 p(x,y)の計測精度 を高めることが重要である.

ターゲット円の二次元座標は,明度分布より計算を 行う.本手法では最低明度の閾値を定め,閾値以下の明 度を0とし,閾値以上の明度を持つ画素については, 以下の式を適用して,明度を重みとした重心計算を行 う.



ここで \mathbf{x} , \mathbf{y} は重心座標, x_0 , y_0 は重心計算範囲の原 点, a_x , a_y はそれぞれの画素数, q(i,j)は画素(i,j)の明 度である.

3. 本手法の検証実験

3.1 実験の概要

本研究では、本手法における計測精度への影響因子 として撮影距離,撮影角度を挙げ,数種類のカメラを用 意しそれぞれの計測精度の実験を行い,デジタル画像 計測におけるカメラの影響を検証した.この実験では, 230万画素デジタルビデオカメラ,1210万画素デジタ ルカメラ用いた.また過去の結果と比較するため1350 万画素デジタルー眼レフカメラの結果 ^{a)}と比較も行っ た.1210万画素カメラでは動画と静止画を撮影した. 反射ターゲットは50mm×50mmのものを使用し,マ イクロメーター付き変位装置を用い0mm,0.1mm, 0.3mm,0.5mm,1.0mmの変位を与えた.装置および 実験条件は**図3-1**に示す通りである.



図3-1 実験装置と実験条件

3.2 カメラの種類と精度の関係の検証

計測結果を以下に示す. なお 1350 万画素デジタルー 眼レフカメラの撮影距離 5.0m 及び撮影角度 15°のと ころは,それぞれ 1.5m と 10°の結果である. はじめ に撮影距離と精度の関係を見てカメラの影響を検証す る.撮影距離が大きくなると写真上のターゲット円は 小さくなる.一般的に写真測量において計測精度はタ ーゲット円のスケールつまり直径 pixel 数と相関があ ることが知られている. **表 3-2**の結果を見ると,今回 の実験においても実証されたことがわかる. 表より静 止画,動画とも直径 pixel 数が約 30pixel 以上あれば外

表3-2 撮影距離と pixel 数,精度の関係

	撮影距離	0.5m	1.0m	5.0m
ビデオカメラ	直径ピクセル数	102	41	計測不能
	外的精度(mm)	0.27	0.38	計測不能
	内的精度(mm)	0.16	0.28	計測不能
デジカメ 動画	直径ピクセル数	62	29	6
	外的精度(mm)	0.02	0.09	0.94
	内的精度(mm)	0.03	0.1	0.68
デジカメ 静止画	直径ピクセル数	62	30	5
	外的精度(mm)	0.03	0.05	0.36
	内的精度(mm)	0.02	0.02	0.34
デジタルー眼 静止画	直径ピクセル数	137	67	44
	外的精度(mm)	0.02	0.04	0.08
	内的精度(mm)	0.01	0.02	0.04

的精度・内的精度ともに 0.10mm 以下で計測できる. 230 万画素ビデオカメラは撮影距離 0.5m から外的精 度・内的精度ともに 0.10mm 以上と計測精度が低い. pixel 数を見ると 0.5m で約 100pixel と多いが精度が低 い. 原因として考えられるのは, 230 万画素ビデオカメ ラでは photoshop で画像の解像度を大きくしているた め,元の画像(図 3-3)は 0.5m で約 5pixel とかなり少 なく,また変換後の画像(図 3-4)を重心計算するとター ゲット円が歪む.この2点が原因として考えられる.



図3-3 230 万画素ビデオカメラ 元画像



図3-4 230 万画素ビデオカメラ 変換後画像

表3-5 撮影角度と pixel 数,精度の関係

カメラの種類	撮影角度	0°	15°	30°	45°
ビデオカメラ	外的精度(mm)	0.27	0.36	0.68	0.34
	内的精度(mm)	0.16	0.25	0.57	0.25
デジカメ 動画	外的精度(mm)	0.02	0.07	0.04	0.04
	内的精度(mm)	0.03	0.04	0.07	0.03
デジカメ 静止画	外的精度(mm)	0.03	0.03	0.03	0.06
	内的精度(mm)	0.02	0.02	0.02	0.04
デジタル一眼	外的精度(mm)	0.01	0.01	0.03	0.02
静止画	内的精度(mm)	0.01	0.01	0.01	0.02

次に表 3-5 に撮影角度別の結果を示す. 1210 万画 素デジタルカメラ,1350 万画素デジタル一眼レフカメ ラでは 0°から 45°で撮影角度が大きくなると少しば らつきがあるものの外的精度・内的精度ともに 0.10mm 以下で計測が可能である.

4. 現場への適用事例

4.1 現場概要



図4-1 現場付近の地形図

計測対象箇所は湛水池斜面内に建設された水抜きト

ンネルである.ダム左岸の斜面で,傾斜は約30°でやや 急な地形となっている.地質は三波川変成帯に属して おり,三波川変成岩である緑色片岩や黒色片岩などの 結晶片岩が分布している.伸縮計やボーリング調査の 結果から想定される深層すべり面は地表から35mと 50m,表層すべり面は地表から5mとされている.



図 4-2 図 4-1 における A-A'断面図

図 4-2 は図 4-1 における A-A'断面図と三次元の水抜き トンネルを合成したものである.想定されるすべり面 は水抜きトンネルの試験枝坑を貫通しており,この付 近は深層すべりの影響を受けていると考えられる.ま た入り口付近では表層すべりの影響を受けているもの と考えられる.水抜きトンネル内にはその地すべりの 影響を受け多くのひび割れが見られ,本手法を用いて 30 か所のひび割れの測定を行った(図 4-3 参照).な お,カメラは 1210 万画素のデジタル一眼レフカメラ を用いている.



図4-3 ターゲット設置概要

4.2 計測結果

図4-4はターゲット No.8 の計測結果である. この ターゲットは地すべりの影響を受けていると考えられ る付近のひび割れである.このひび割れは縦にトンネ ルの横壁から天井,床にまで及ぶこと,この周辺の他 のひび割れには大きな変化が見られないことから,地 すべりの影響を一番受けるすべり面直下であることが わかる.



図 4-4 No.8 計測結果

その他のターゲットについて,図4-5に示す No.16 のようにトンネルの斜面が平行になっている部分に設 置したターゲットには変位がみられないものもあった. このことからすべてのひび割れを監視する必要はない と考えられる.



5. 結論と今後の課題

5.1 結論

本研究では、デジタル画像計測においてカメラの種 類が計測精度にどのように影響を与えるかを検証した. 計測精度 0.10mm 以下の精度を得るにはターゲット円 の直径 pixel 数が約 30pixel 必要であり、この pixel 数 から撮影距離が決まるということが言える.ただし、カ メラ自体の pixel 数が少ないと重心計算後の画像のタ ーゲット円が歪み計測精度が 0.10mm 以上となる.ま た,本研究で用いたカメラでもデジタル画像計測の理 論が適用できることが検証された.また動画でも精度 が 0.10mm 以下となることから動画であっても精度は 保証されると考えられる.また,現場では 30 か所にタ ーゲットを設置しているがその中には変位が少ないも のも存在する.重要なひび割れの選定し監視すること で実際に現場へ適用させていく際にコストを抑えるこ とができる.

5.2 今後の課題

本研究における今後の課題について述べる.

- 本研究ではレンズについては考慮していないがレ ンズ交換型ビデオカメラなどを用いレンズの影響 なども検証する必要がある.
- ② 本研究の検証実験においては、フラッシュを用いていないが、ターゲット円の重心座標は本手法唯一の観測値であり、重心計測精度は重要であり、これは明度を重みとして計算しているためライトなどの光を当てることにより計測精度が向上することが考えられる。
- ③ ひび割れの進行を評価するにあたって管理基準値 が存在しないため定量的な判断が出来ないのが現 状である.急激なひび割れ幅の進行は危険であるこ とは明らかだが、客観的な指標が必要となる.

参考文献

- 1) 龍明治,大西有三,西山哲,中井卓巳:デジタル画 像計測による斜面モニタリングシステムの研究,地 盤工学ジャーナル, Vol.3, No.2, pp.109-119, 2009
- 2) 金澤彬: デジタル画像を用いたひび割れ幅計測手法の研究,京都大学修士論文,2013
- 3) 秋本圭一,服部進:画像計測の基礎,岡山職業能力 開発短期大学校紀要,Vol.11, p23-38, 1997
- 4) 秋本圭一:情報化施工のためのデジタル画像計測法 に関する研究,京都大学博士論文,2002
- 5) 三浦悟:土木計測分野におけるデジタル写真測量の 高度化に関する研究,京都大学博士論文,2005