# デジタル画像計測の岩盤のり面変位計測への 応用に関する研究

龍明治1\*·大西有三2·西山哲2·的羽正樹3·中川渉4·谷尚幸4

<sup>1</sup>株式会社 アーステック東洋(〒601-1374 京都市伏見区醍醐西大路町44-32)
<sup>2</sup>京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
<sup>3</sup>近畿地方整備局 紀南河川国道事務所(〒646-0003 和歌山県田辺市中万呂142)
<sup>4</sup>応用地質株式会社(〒532-0021 大阪市淀川区田川北2-4-66)
\*E-mail: ryu@earthtech-toyo.com

本論文は、デジタル画像計測を岩盤のり面の崩壊対策工の設計に応用した事例を紹介する.のり面表面 変位の等高線図をデジタル画像計測結果から作成し、その結果、崩壊危険箇所の抽出が可能となり、効率 的に補修工事を実施することができた.これらは、多数計測点の計測を低コストで簡単なデジタル画像計 測によって実現できた.デジタル画像計測は、多点(数百点)の3次元座標を計測する利点があり、我々 は様々な位置から撮影された多数枚の画像を使って高精度の計測を実現するデジタル画像計測を開発して きた.本研究では、セルフキャリブレーション付きバンドル調整法を用いた自動解析コードを斜面モニタ リングのために作成し、画像撮影後2時間以内で計測結果を得ることを可能にした.

*Key Words : digital precise photogrammetry, bundle adjustment with self calibration, collinearity condition, resection, exterior orientations, rock slope,* 

# 1. まえがき

デジタル画像技術は、IC技術の躍進と画像処理技術の 高度化によってデジタルカメラの高画素化とともに急速 に普及している.しかもデジタルカメラは、数年前の製 品に比べると1000万画素を超える高画素のものでも入手 しやすい低価額で販売されるようになってきている.

測量分野では、2枚の写真から3次元地形を得る立体 視の技術が航空写真測量に応用されており、地上の測量 でも、遺跡や文化遺産の形状の記録に写真測量が活用さ れている<sup>1)</sup>.また、工業技術分野では、製品の寸法検査 や船舶など大型構造物の寸法計測など、計測環境が整っ ている室内での高精度の計測に実用化されている.

このような背景から,我々は,土木構造物(特にトン ネル,斜面・のり面など)の野外の撮影という計測環境 下でも良好な精度を得る研究を行ってきた.また,広範 囲な撮影対象物や数百点の計測点に対しても,迅速に3 次元座標を得られるように実用化した.特に,多数のデ ジタル画像(以下は画像と称する)を用いて高精度に計 測点の座標を計測する技術をデジタル画像計測と呼んで おり,計測の簡易さ,撮影位置の自由度,コストが安価, 短時間で多点(数百点)の3次元座標を得ることが出来 るなど優れた計測技術であると考え,その普及を進めて きた<sup>2394</sup>.

本論文は,解析手法として煩雑な操作性を克服するた めに,DLT解法(Direct Linear Transformation)と単写真 標定を併用した後方交会法から,外部標定の要素を求め る手法を構築し,その後,前方交会法及び後方投影法を 用いることで計測を自動化し,リアルタイムの計測を実 現した研究成果を報告するものである.また,本手法の 応用例として,長大のり面の対策工設計への支援として, 当のり面の変位の面的分布を求め,対策工法を決定する ための基礎資料とした研究成果を報告する.

## 2. デジタル画像計測の基本原理

#### (1) 計測解析の基本原理

写真測量は、写真上の2次元座標から計測点の3次元 座標を求める技術であり、一対のステレオ写真を用いる ことで実現することができる、しかし、一般には高精度 を得るためには、カメラのレンズ歪みなどを求めるとい う煩雑な手法があらかじめ必要とされる.

デジタル画像計測も同じ原理を用いており,画像上の 2次元座標から計測点の3次元座標を求める技術である. 撮影にはデジタルカメラを用いるので,従来の写真と区 別して画像という言葉を用いる.デジタル画像計測は, 被写体にターゲットを貼り付け,様々な撮影地点及び角 度から,多数枚の画像を撮影し,画像上のターゲット像 の重心の2次元座標を求め,バンドル調整法を用いるこ とにより,測定点であるターゲットの3次元座標を求め るものであるが,レンズ歪みも同時に校正するセルフキ ャリブレーション付きバンドル調整法(bundle adjustment with self calibration)を導入して解析する のが本研究の特徴である.

解析上に既知データとして得られるのは,撮影された 各画像上のターゲット像のx, y座標のみである.計測点

(P)・投影中心(o)・ターゲット像(p)が一直線 上にあるという条件からひとつのターゲット像(p)に ついて式(1)の共線条件式が導かれる. 図-1 に示す 幾何学的条件から観測方程式群を作り,セルフキャリブ レーション付きバンドル調整法によりターゲットの3次 元座標の最小2乗解を求める.式(1)の(x, y, c)は,図-1のカメラ座標系でのターゲット像の座標 p であり,( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ )は,レンズ歪みの修正項,(X, Y, Z)は計測点の座標,(Xo, Yo, Zo)はレンズ,即ち投影中 心座標,  $m_{ij}$ は座標回転行列要素, cはレンズの焦点距 離である.



図-1 カメラ座標系と観測対象座標系の関係式

$$\begin{aligned} x &= \Delta x - c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= \Delta y - c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned}$$
(1)

方程式の個数は,画像上の計測点1個に付きx,y座標 一つずつ得られるので,計測点の2倍となる.未知数は, 計測点の3次元座標,カメラの位置,姿勢(角度),レ ンズの歪みを表すための係数(ここでは8個)である. 例えば計測点が20個あり,15枚の画像を得たとき方程式 は 20×15×2 = 600 個となる.

ここでの未知数は、次の3つのグループに分類される.

①計測点の3次元座標:(X, Y, Z)

- ②外部標定要素:カメラの撮影位置(Xo, Yo, Zo),カメ ラの姿勢(角度)を表す(θ, φ, κ)の6個の変数. ただし、撮影箇所1箇所につき6個必要となる.
- ③カメラの内部パラメータ:焦点距離やレンズの歪み係 数など、本研究では、前述のとおり係数を8個に した。

共線条件式における未知数は、計測点の数をn,画像の枚数をmとすると、計測点座標は3n個、外部標定要素は6m個、カメラの内部パラメータ(8個)を合わせて3n+6m+8個存在する.

数理的にカメラ内部パラメータは、未知数とせず、オ フラインで、例えば専用のカメラ校正装置などを用いて、 求めることが可能である.しかし、この方法では、本来 の計測作業に加えて、専用の装置と解析を必要とするの で、コストが上昇し、時間がかかることになる.これに 対し、我々は、カメラ内部パラメータも他の未知数と同 様に組み込み、同時に求めるセルフキャリブレーション 付きバンドル調整法を採用した.この手法により内部パ ラメータが未知のカメラを使っても誰でも容易に計測が 可能である.

#### (2) ターゲットの重心計算

デジタル画像計測を高精度にするには、式(1)に示す 観測値である画像に写っているターゲット像の2次元座 標のp(x,y)の計測精度を高めることが重要である. ターゲット像の2次元座標は、唯一の観測値であり、後 の解析計算の精度を確保するための生命線といえる.

ここで、ターゲットの2次元座標を求める方法について解説する.

図-2 は、画像上のターゲット像の輝度分布の一例で あり、背景を暗くしてターゲットの部分が明確にするよ うにフラッシュの光を反射するターゲットを用いて、露 出を絞ってフラッシュ光の下で撮影したものである.ま た、2次元座標の計算を簡素化するためには、撮影した 画像をコンピュータに取り込む際に、カラー画像からグ レースケール画像に変換し、輝度を各画素8ビット(0 ~255)に変換する.



図-2 ターゲット像の輝度分布の一例

ターゲット像の2次元座標計測は、初期条件として定 めた範囲内の輝度分布計算を行うものであり、その方法 は多様であるが、1つの方法として、輝度の閾値を定め、 閾値以下の画素輝度を0とし、閾値以上の輝度を持つ画 素については、式(2)を適用して、輝度を重みとした重 心計算によって行う、ここで、x,yは重心座標、a,, a,は それぞれの画素サイズ、q(i, j)は画素(i, j)の輝度で ある.この作業により、背景のノイズにもよるが、1画 素の数分の1から数十分の1の精度で画像上のターゲッ トの2次元座標値を求めることができる.

$$\mathbf{x} = \mathbf{a}_{x} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} (q(i, j) \times \mathbf{x}_{ij})}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} q(i, j)} \qquad \mathbf{y} = \mathbf{a}_{y} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} (q(i, j) \times \mathbf{y}_{ij})}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} q(i, j)}$$
(2)

また、本解析作業では、ターゲットの2次元座標値の 計測と同時に、各画像上のターゲットの認識を行う.こ れは、一つの計測点(ターゲット)に対して、どの画像 のどの像がそれに対応するものなのかを区別して、番号 を付けていく作業に相当する.

この作業について, 我々はリアルタイムの計測を実現 する画像マッチング手法を用いて1枚画像にあらかじめ 付加したターゲットの番号を自動的に他の画像上のどれ に相当するか検索し,対応する像の重心を計算するとと もに同じ番号を付加する理論も開発した.本論文では, 図-3 に示すような後方投影法を用いて共線条件式にし たがって同じ計測点が各画像上でどの像に相当するのか を認識するものであり,後に述べる各手法を用いて実現 している.



図-3 後方投影法によるターゲットの認識

#### (3) 外部標定要素を求める手法

前述の自動化のためには、まず外部標定要素を求め、 撮影状態のカメラと対象物の幾何学的関係を明らかにす る、即ち撮影時の状態を復元する必要がある.このため に最初にカメラの撮影位置と角度である外部標定要素を 求める必要がある.この方法には、一般に初期近似値を 必要とする単写真標定と呼ばれる方法がある.一方, DLTと呼ばれる初期値を必要としない理論もある<sup>5</sup>.本 研究では、外部標定要素の初期近似値を求めるために DLT法を用い、この値を用いてさらに高精度の値を単写 真標定によって求めるという従来の手法を組み合わせる ことを提案する.その精度については、後の現場計測で 実証する.

# (4) ターゲットの認識手法

前述の方法で外部標定要素を高精度に求めた後に、こ こで述べる前方交会法を用いてターゲットの3次元座標 を算出する.ここでいう算出とは、計測点の初期近似値 を求めることであり、その後これまで航空写真測量にお いて高精度の座標値を求めるために用いられてきたバン ドル調整法による最小2乗解を求める.

斜面やのり面の挙動を監視するための計測は、多数の 計測点が必要であるため、ターゲットの初期近似値を求 めるための時間を短縮しなければ、リアルタイムの計測 を実現することができない.

そこで、本研究では、図-4(a)に示すように6点の既 知座標をあらかじめ計測しておき、それを撮影すること で(3)で述べた外部標定要素の計測を行い、撮影状態を 復元した2枚の画像を使って図-4(b)に示すような前方 交会法を用いて共線条件式の交点から計測点の初期近似 値を算出する.即ち、図-4(b)に示すように画像を2枚 組合せ順次撮影された計測点の座標を求めていく.ただ し、その過程においては、(2)で述べた後方投影法に用 いたターゲットの自動認識技術を導入する.これにより、 撮影後にパソコンに画像を取り込んだ後の処理を自動化 させることが可能になる.





(a)外部標定要素の算出法



図-4 自動化プロセスの概念

# 3. のり面対策工設計への支援事例

#### (1) 事例概要

計測対象箇所は、図-5 に示すように国道42号沿いの、 海岸線に沿った法高さ47mの長大のり面である.ほぼ地 層の勾配(約40°傾斜)と同傾斜で切土が行われ、コン クリート吹付け工によるのり面保護が行われている.

地質構成は,新生代第三紀の田辺層群白浜累層の砂岩 泥岩互層より構成される.層理面は非常に連続性が良く, 単一のり面ではほぼ一様な走向・傾斜である.



図-5 デジタル画像計測対象のり面

ここでは、道路防災点検などで、継続的に監視が行われている. 定期点検時に、吹付けのクラックが拡大傾向 であることから、変状の進行状況・範囲の把握を行い、 対策工検討の基礎資料を得ることを目的として、詳細調 査を実施するに至った.

孔内傾斜計観測による変位深度の把握や、遠隔監視シ ステム(i-SENSOR伸縮計)による変位状況の監視を行い、 吹付けの変状が著しい区間で、いずれも緩慢な速度での 変位が確認された.

一方, 吹付け面には, ヘアクラック等の小規模なもの も含め,大小様々なクラックがのり面全域に分布し, ク ラックの分布を把握することだけでは,変位しているブ ロックの範囲を確定することが困難であった.したがっ て,デジタル画像計測を実施し,変位のあるブロック範 囲を確定する基礎資料とした.

# (2) デジタル画像計測の実施方法

対象のり面は、比較的緩い勾配(45°)であり、平面 ターゲットをのり面表面に直接貼付けると画像に写らな いため、図-6に示すL型のターゲット台座に、ターゲ ットを貼付けた上で、のり面に取り付けることにした. また、ターゲットの配置は、図-7に示すように崩壊箇 所や亀裂密集箇所を中心に3m間隔で160点を設置し、 その周りに3m×6mの千鳥状に82点,更に外側に4 m×4m間隔で千鳥状21点を設置した.撮影方法は, 対象のり面の対面が海であるため,図-5に示す国道の 路肩から撮影することにした.図-7に示すように,1 箇所あたりに6~9枚の撮影をカメラ回転させながら1 1箇所の撮影箇所から合計81枚の画像を撮影した.カ メラを回転させるのは,レンズ歪みを取り除くためであ る.図-8は,ターゲットを設置する状況である.



図-6 ターゲットの仕様



図-7 撮影及びターゲットの配置計画図



図-8 ターゲットの設置状況写真

#### (3) デジタル画像計測結果

表-1 に計算解析に使用された画像枚数やターゲット の点数,撮影条件及び計算結果の精度を示す.なお,用 いたカメラは,600万画素であった.

表-1 画像計測の解析条件及び結果	の精度一覧表
-------------------	--------

測 定 日	11月13日	12月22日	2月12日
写 真 枚 数( 枚 )	72	84	89
ターゲット数(点)	267	251	296
<u>焦                                  </u>	35	35	35
撮影平均距離(m)	40	40	42
Y 軸の平均精度(mm)	2.45	1.88	2.29
Z 軸の平均精度(mm)	1.66	1.50	1.47
X 軸の平均精度(mm)	3.00	2.47	2.42
平 均 精 度 ( m m )	2.43	1.99	2.10



図-9 3次元変位ベクトル図(3回目)

I:変位が顕著に現れ、対策工を考慮する必要がある.

計測結果によると、図-9 に示すようにのり面右側に 顕著な変位がみられ、特にのり尻部の変位が継続的に続 いており、地質調査の結果と良く一致することが確認さ れた.一方、図-10 に示すのり面の北側は、微少な変位 が観測されたが、累積性の変位は確認されず、降雨量や 気温などの自然条件の変動による観測誤差の範囲内にあ ると評価できる.図-10 は、変位量を2mm間隔の等高線 で色区分したものである.

ここで、変位量を3段階に区分すると、変位量8mm以上の箇所を「I」として区分けした範囲が、のり面の南 西端ののり尻附近である、変位量6~8mmを「II」として 区分けした箇所は、不規則に分布している.

なお、変位量6mm以下を「Ⅲ」として区分した範囲は、 変位量が比較的小さく、バラつきが認められることから、 自然条件の影響を受けた計測の誤差範囲内であると考え られ、有意な変位ではないと判断した.

А	地質条件	末端部が急勾配であり,層理面が流れ盤 の地質構造となる.
区間	変状の状況	進行性の変状が確認される.
[8]	対 策 方 針	抑止工を主体とした対策を実施する必要 がある.
в	地質条件	末端部が急勾配であり, 層理面が流れ盤 の地質構造となる.
区間	変状の状況	変状が認められるものの,変状の進行状 況は不明(極小さい).
	対 策 方 針	表層の弛みからの小崩壊に対応できる対 策を行う必要がある。
C 区 間	地質条件	切土勾配がほぼ層理面の傾斜と一致す る.
	変状の状況	ヘアクラック等の軽微な変状が認められ る.
	対 策 方 針	地山には問題ないと判断できるが,将来 的な吹付けの剥離程度の崩壊に対する対 応が必要。

表-2 対策工検討方針



図-10 変位等高線図(3回目)

図-11 対策方針区分布図

# (4) 対策工について

対策工については、現地踏査、ボーリング調査、熱赤 外線映像法探査・コア抜き調査、孔内傾斜計測定などの 調査結果とデジタル画像計測結果を総合的に判断し、 表-2 に示す方針のもとにのり面全体を図-11 に示すよ うにA、B、Cの3区間に分け異なる工法を提案した. 図-12 は完成後の状況写真である.



図-12 対策工完成後状況写真

# 4. まとめ

デジタル画像計測は、長大のり面における面的な変位 の分布をデジタルカメラによる撮影という簡単な計測作 業だけで高精度に求めることができる.

特に,この手法は本論文に示すごとく数百点の変位を 求めることが簡単に行え,変位等高線図を描くことが可 能となり,対策工を効率良く提案することができた.

特に前述したのり面の変位計測では画像をパソコンに

取り込んでから2時間で完了させることが可能で迅速に 対応することができた. つまり従来のトータルステーシ ョンを用いた測量に要する労力と時間を大幅に短縮する ことができ,かつ計測に用いた機器はデジタルカメラと パソコンだけで低コストの計測を実現することが可能と なった. ここでは,前述の外部標定要素を求めるための 既知点を従来の光波測量によって得たが,あらかじめ座 標値を計測した基準尺のようなものを撮影画像に写るよ うに工夫することで,より簡便な計測を実現することが 可能になる. 今後は,ターゲットなしの計測法(例えば のり面の模様や幾何学的な特徴を計測点とみなす計測 法)の開発を進める予定である.

#### 参考文献

- 1) 社団法人 日本写真測量学会:解析写真測量.1996.
- 大西有三,中井卓巳,龍明治,西山哲:トンネルの変 形計測のためのデジタル写真測量法の研究,材料, Vol. 52, No. 8, pp. 1006-1011 (2003)
- Meiji RYU & Takumi NAKAI & Kenji FUZIMURA, Yuzo OHNISHI & Satoshi NISHIYAMA & Takao YANO, Der-Her LEE : Application of photogrammetry method on a slope monitoring in Taiwan: ISRM International Symposium 3rd ARMS Kyoto, pp.787-790 Vol2 (2004)
- 4) 龍明治、中井卓巳、大西有三、西山哲、矢野隆夫、李 徳河、張舜孔: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、台湾公共工程學會、台日地下空 間建設工程調査・計測技術交流検討會、論文 集,pp.105-115,(2005)
- 5) 西山哲,大西有三,大津宏康,矢野隆夫,龍明治,李 徳河:デジタル画像計測法の斜面防災モニタリングシ ステムへの応用に関する研究,応用地質,44,6,pp.331-340,(2004)

# STUDY ON APPLICATION OF DIGITAL PHOTOGRAMMETRY TO MEASUREMENT OF SLOP BEHAVIOR

# Meiji RYU, Yuzo OHNISH Satoshi NISHIYAMA, Masaki MATOBA, and Wataru NAKAGAWA, Naoyuki TANI

In this paper, the digital photogrammetry was introduced as a design support technology of a slope repair works. The contour map of surface displacement was made form measurement results by the digital photogrammetry and prevention method of slope collapse was consider using contour map. This process was possible only by the digital photogrammetry because we could measure lots of measurement points within an easy procedure and low costs. We made an automatic analysis code whit self-calibration bundle adjustment method for slope monitoring, so it could take within 2 hours to get the measurement results after taking digital images.