

(59) 精密写真測量による不連続面計測について

京都大学工学部 岡本 厚
京都大学工学部 大西 有三
京都大学大学院 ○藤原 弘一

The measurement of rock discontinuity using precise photogrammetry

Atushi OKAMOTO, Yuzo ONISHI and Kouichi FUJIWARA (Kyoto University)

ABSTRACT

The collection of geometrical property data is a very important factor for the evaluation and the prediction of the mechanical behavior of the rock masses. Recently, a variety of approaches have been applied for surveying rock mass outcrops with the development of computers and image processing techniques. In this study, we measured the joints seen in tunnel faces using photogrammetry and identified the three-dimensional location of the discontinuities. The goals of this study are to construct the foundation of data collection technique and the automated measurement-evaluation system.

1. はじめに

従来より、岩盤中のトンネル切羽や地下空洞の内壁といった掘削面の観察は、専門的な技術、ノウハウをもった地質技術者の手に負うところが多い。特に施工時には時間的な制約もあり、得られるデータの精度は必ずしも高いとは言えず、また常に人的偏向が伴う。そういった露頭面観察において写真測量手法を応用してやることによって、手作業に比べて非常に正確に、効率的にデータ採集を行うことが可能となる。

本研究ではこうした手法を用いたデータ採集技術の基礎を構築し、将来的には計測～評価を総合的に行えるシステムの構築を目標としている。

2. 写真画像を用いた不連続面の抽出手法

2. 1 写真解析理論

これまで露頭面観察に用いられてきた写真測量技法のほとんどは、写真解析手法として DLT 法(The Direct Linear Transformation)を用いたものであった。この手法は被写体の 3 次元座標 (X, Y, Z) と写真画像上の 2 次元座標 (x_c, y_c) を射影変換を用いて次式のように関係づけるものである。(図-1)

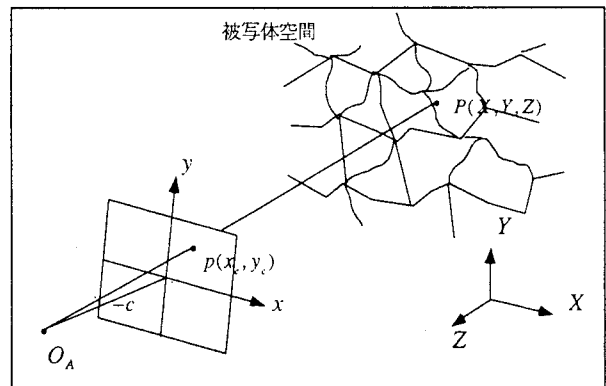


図-1 DLT 概念図

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4}{A_9 X + A_{10} Y + A_{11} Z + 1} \\ y_c &= \frac{A_5 X + A_6 Y + A_7 Z + A_8}{A_9 X + A_{10} Y + A_{11} Z + 1} \end{aligned} \quad (式1)$$

この式を構成する係数 $A_1 \sim A_{11}$ (標定要素)の値は、カメラの内外で与えられる内部標定要素 (c : 画面距離, x_H, y_H : 主点距離) と外部標定要素 (X_0, Y_0, Z_0 : カメラ投影中心の座標, ϕ, ω, κ : カメラの傾き)、及び写真の線形歪等がミックスした形で含まれたものであり、内部標定要素が未知数である非測定用カメラで撮影する場合に多用されていく。しかし、こうした係数を求めるためには、被写体空間上に座標が既知な点を6点以上置く必要がある。

これに対してもう一度、共線条件式の係数を内部標定要素と外部標定要素に分けて考えてやり、かつ撮影に際して1台のカメラのみを用いることによって各写真上の内部標定要素間に拘束条件を与えてやって、写真解析をおこなう手法がSelf Calibration 法である。(式2、図-2)

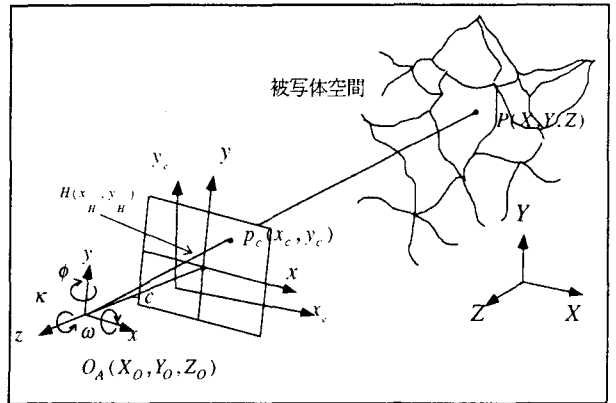


図-2 Self Calibration 概念図

$$\begin{aligned} x_c - x_H + \Delta x &= -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \\ y_c - y_H + \Delta y &= -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (式2)$$

ここで、 $\Delta x, \Delta y$ はレンズ歪み等の非線形歪み (モデル化可能)

$$a_{ij} = f(\omega, \phi, \kappa) \quad (\omega, \phi, \kappa \text{ はカメラの回転角})$$

1台のカメラのみを用いて複数の写真を撮った場合、カメラの内部標定要素 (つまりカメラの内部寸法) はどのカメラでも一定とみなすことができるので各写真の内部標定要素間に拘束条件が発生する。仮に3枚撮った場合、これらの拘束条件は次式のようになる。

$$\begin{aligned} c_1 &= c_2 = c_3 \\ x_{H1} &= x_{H2} = x_{H3} \\ y_{H1} &= y_{H2} = y_{H3} \end{aligned}$$

そして、これらの拘束条件を導入して写真解析を行えば、実物と相似なモデルを形成することができ、さらに被写体空間上に既知な長さ情報 (例えば長さが既知な棒) を入れておけばこれを実物と合同なモデルを形成することが可能となる。

このようにSelf Calibration 法を用いた場合、DLT 法を使った時と比べて撮影時に要する手間は少なくすみ、測量的にもより高精度を見込むことができるため、撮影に際して様々な拘束がある施工現場では威力を発揮すると思われる。

2. 2 不連続面の抽出

2. 2, 1 平面算出用の点の準備

通常、切羽では不連続面は線状の亀裂の形態をとる場合と面として露出している場合の2形態が考えられる。そこで、写真画像上で平面を決定するためのポイントを設定するにあたっては、線状の不連続面の場合には亀裂線 (つまり平面の縁) の上に、面状の場合には面の上に点をとることになる。

2. 2, 2 平面方程式の決定

不連続面と思われる平面を抽出するにあたっては、最低3点の三次元座標があればよいわけであるが、自然界に存在する複雑に歪曲した平面を適当な精度で抽出してやるためには平面上に4~5点とり、それらの座標値にたいして最小2乗法の「未知量を持った条件つき観測」手法を用いて平面方程式の係数を算出する。仮に図3の様に座標系を設定すると、方程式は式3のように示すことができる。

$$aX_i + Y_i + cZ_i + d = 0 \quad (式3)$$

a, c, d を近似値と補正量とに分け、 X_i, Y_i, Z_i の誤差を考慮して書き換えると

$$(\bar{a} + \Delta a)(X + v_x) + Y + v_y + (\bar{c} + \Delta c)(Z + v_z) + \bar{d} + \Delta d = 0 \quad (式4)$$

この式を線形化、変形してやると

$$\bar{a}v_x + v_y + \bar{c}v_z + X\Delta a + Z\Delta c + \Delta d - \{-(\bar{a}X + Y + \bar{c}Z + \bar{d})\} = 0 \quad (式5)$$

ここで、 $w = -(\bar{a}X + Y + \bar{c}Z + \bar{d})$ とし、式5を多数の被写体点に対して立てると、次のように表すことができる。

$$\mathbf{A}^T \mathbf{v} + \mathbf{D}^T \Delta \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{w} = 0 \quad (式6)$$

ここに $\mathbf{A}$ は残差の行列、 $\mathbf{D}$ は未知量 (平面の係数) の係数行列であり $\mathbf{v}, \Delta \hat{\mathbf{x}}$ はそれぞれ観測量の残差ベクトル、未知量の補正量ベクトルである。上式を条件式とし最小二乗法を適用すると、未知量の最確値ベクトルは

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{D}\mathbf{N}^{-1}\mathbf{D}^T)^{-1}\mathbf{D}\mathbf{N}^{-1}\mathbf{w} \quad (式7)$$

$$\text{ここで } \mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{A}$$

となる。

3. シミュレーション

Self Calibration プログラムの試行と最適撮影位置の探索を兼ねて、シミュレーション計算を行った。またこのシミュレーションによって写真解析精度の理論値を求めることができる。今回は図-3のような矩形断面を想定し長さ情報を10本置いた場合について、4つの撮影パターンの計算を行ってみた。結果を表-1に示す。

表-1 シミュレーション結果

パターン	写真枚数	撮影方向	平均内的誤差	平均外的誤差
1	2	平行	4.724	4.868
2	2	収束	4.624	4.791
3	3	平行	5.410	5.902
4	3	収束	4.221	3.864

単位: mm

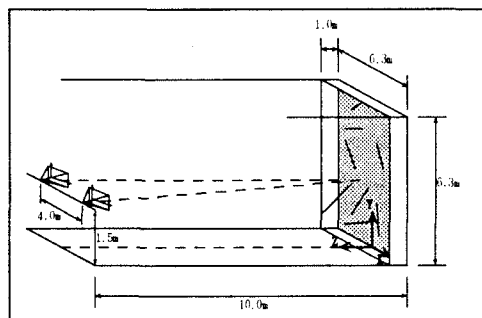


図-3 シミュレーション概念図 (パターン2)

これより、仮に切羽撮影時に解析を行うに十分な情報を画像中に写し込むことができ、写真データを理想的な条件で座標解析することができた場合には、約4～5 mmの精度で切羽空間の3次元座標を得ることが可能であることがわかる。

4. 実写真を用いた精度検証テスト

4. 1 Test Field

実際に撮影した写真にSelf Calibration手法を用いた場合の精度テストと、平面決定計算のテストを行うために切羽面を想定したTest Fieldを構築して撮影実験を行った。撮影に際してはミノルタ社製一眼レフカメラ一台、フラッシュ、三脚、35mmレンズを使用しカメラと被写体の距離は約11m、各撮影地点の間隔は約2.4mとした。被写体空間中には、不連続面を模した板と線を16面、被写体上に長さ情報を与えるための棒を10本配置した。特に板を用いた仮想不連続面に関しては、2, 2, 1で述べた岩盤形状を表現するために、2通りの表現方法を考えた。(図-4、写真-1)

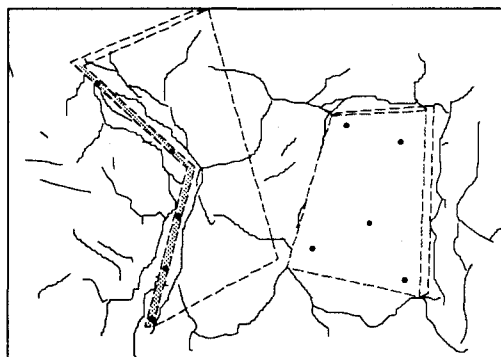


図-4 板を用いた不連続面の表現

4. 2 座標解析

写真画像上の点はネガフィルムの状態で1 μmのオーダーで読み取り、3次元座標解析に用いた。

写真画像を Self Calibration 法で解析し、各々の平面上の点の3次元座標の計算値と撮影時にトランシットを用いて得た測定値を比較した結果、誤差は平均 8.5mm 程度であった。

4、3 平面方程式の算出

各平面上に各々載っている点の座標値と 2、2、1 の手法を用いて、平面方程式の係数を計算した。結果を表-2に示す。

表-2 平面方程式の係数の算出例

面番号	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
1	-0.617	23.0342	196701.9
2	0.009	0.235	1601.1
3	3.306	0.078	-13739.4
4	2.075	2.57	20628.7
5	-4.969	-4.439	57.3

一般形： $aX + Y + cZ + d = 0$

5、トンネル切羽における撮影テスト

トンネル掘削現場において実物切羽の画像情報を得るために撮影実験を行った。対象となった切羽断面は約 6.5m×6.5m で、比較的岩質が良いとされる地域に位置している。不連続面の走向・傾斜を決定するための情報としては、被写体空間内に南北方向にサブテンスバーと呼ばれる水平棒を設置した。撮影に際しては長さ情報は 1 2 本設置したが、現場の状況から切羽面全体に万遍無く配置することができず、画像の一部分に偏って写り込む配置となってしまった。(写真-2)

筆者らはこれらの切羽写真を用いて不連続面抽出～キープロック解析を行ったが詳細については講演時にゆずる。

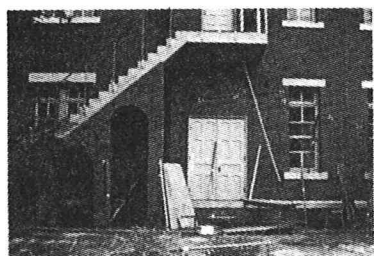
6、おわりに

岩盤の露頭面観測に写真測量の解析手法の一種である Self Calibration 法を適用することを試みた。シミュレーション計算を行って精度の理論値を計算したところ、その平均内的誤差は約 5mm 程度となった。また、実際に撮影した写真を解析した場合の精度は約 8.5mm となった。この値は仮にキープロック解析に用いる不連続面の抽出精度を 1cm と考えた場合、これを充分満足するものであると思われる。

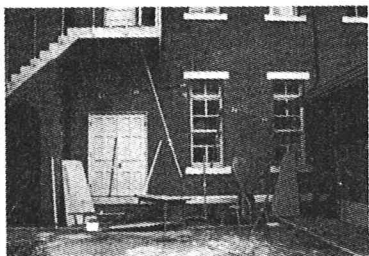
今研究での一連の撮影～解析作業は全てアナログ写真を用いて行ったが、これらの処理は CCD カメラ、デジタルプロッター等を用いることによって容易にデジタル化することが可能である。今後は異常値検索、画像の自動マッチングといった画像処理プロセスを追加して、切羽画像の自動解析システムを構築してゆく予定である。

参考文献

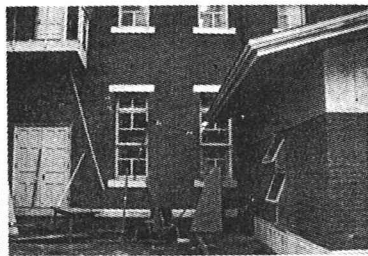
1) Okamoto, A.,The Model Construction Problem Using the Collinearity Condition. Photogrammetric Engineering And Remote Sensing, Vol. 50, No.6,June 1984, pp. 705-711



左写真

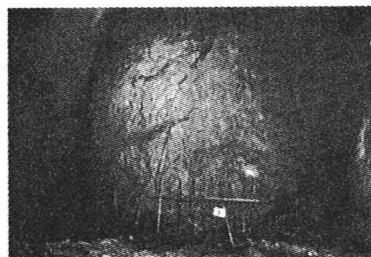


中写真

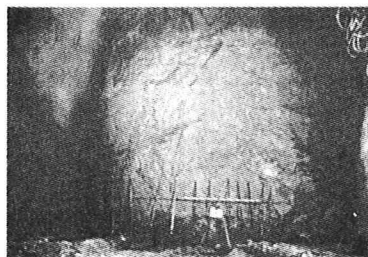


右写真

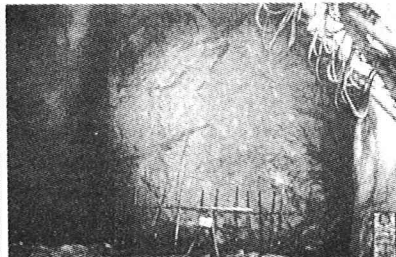
写真-1 Test Fieldで撮られた写真（3枚対、平行撮影）



左写真



中写真



右写真

写真-2 トンネル切羽写真（3枚対、収束撮影）