

トンネルにおける情報化施工のための精密写真測量手法に関する研究

京都大学大学院	正会員	大西有三
京都大学大学院	正会員	大津宏康
京都大学大学院	正会員	西山哲
西松建設	正会員	○藺田健

1. はじめに

近年、土木分野において情報化施工という考え方が普及してきており、それはトンネル施工においても例外ではない。トンネルの掘削工事においては事前調査だけでは信頼性の高い情報の入手が特に困難であり、切羽の安定性の評価や崩落の予知・予測を行うためには施工中の調査や計測が重要となる。

本研究では、トンネルの動態観測にデジタルカメラを用いた精密写真測量手法を適用し、またその際に生じる問題点を解決することを目的とする。この手法は、容易に短時間で多点計測が可能であるなどの利点を持つが、土木分野に適用されだしたのは、デジタルカメラやパソコンが普及しだしたごく最近のことであり、開発途上の技術である。

2. 計測手順

まず計測したい点に反射ターゲットを設置する。また、計測対象の大きさを決定するための基準尺を用意し、それらを同時にデジタルカメラで撮影する。その際、フリーハンドで撮影することができるが、複数の方向から姿勢を変えながら1枚の写真にできるだけ多くの反射ターゲットが写るように撮影する。その後、撮影画像をコンピュータに取り込み、計測点の3次元座標を算出する。

3. 解析手法

画像座標 (x, y) と対象空間座標 (X, Y, Z) とがカメラの原点(レンズ中心) (X_0, Y_0, Z_0) を介して一直線上に存在するという原理に基づいており、この関係を式に表したものを共線条件式という。

$$x + \Delta x + c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = 0$$

$$y + \Delta y + c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = 0$$

ここで、 $M = (m_{ij})$ はカメラの回転行列、 Δx および Δy はレンズひずみ、 c は画面距離である。この共線条件式は未知数について非線形なので、初期値のまわりでテーラー展開して線形化する。こうして得られるのが、次の観測方程式である。

$$\mathbf{v} + A\mathbf{x} = \mathbf{e}$$

$\mathbf{v}$: 残差ベクトル

A : 係数行列

$\mathbf{x}$: 未知数ベクトル (補正量)

$\mathbf{e}$: 残存量ベクトル

続いて、残差 $\mathbf{v}$ の2乗を最小にすることにより、正規方程式が得られ次式で表される。

$$A^T A \mathbf{x} = A^T \mathbf{e}$$

これを解けば未知数の解が得られるが、基準点がない場合、係数行列にランク落ちが生じる。つまり観測値が不十分であるために解を一意的に決定できない。よって、未知数の一部または全ての分散を最小にするという拘束条件を設けて解を決定する。

4. 撮影ネットワーク

計測点座標の精度は、撮影枚数やターゲット数の他、対象点を撮影する角度にも影響される。

撮影角度については、1つの点を2つ以上の方向から撮影するとき、できるだけ大きな角度をとって撮影することにより、高精度で計測を行うことができる。十分な角度をもって撮影されたネットワークを「強いネットワーク」という。撮影ネットワークについては次のような関係がある。

$$\sigma_{XYZ} = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot \frac{d}{c} \cdot \hat{\sigma}_0$$

キーワード 情報化施工、精密写真測量手法、共線条件式、撮影ネットワーク、球形ターゲット

連絡先 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科土木システム工学大西研究室 TEL075-753-5129

- σ_{xyz} : 座標推定精度
- q : ネットワークの強度を表す係数
- k : ひとつの撮影場所から写した枚数の平均値
- d : カメラから対象物までの概略距離
- c : レンズの画面距離
- $\hat{\sigma}_0$: 画像面上誤差

撮影ネットワークが強いほど q は小さい値をとり、強いネットワークでは 0.5~0.7 となる。

ここで現場計測の例を挙げる。施工中のトンネル内での計測で、次のような解析結果が得られた。

- ・画像面上誤差 :0.5903 μ m
- ・座標推定精度 x:0.2591mm
y:0.1757mm
z:1.6667mm
xyz:0.9791mm

ここから、 q を計算すると 1.99 であった。この値から、撮影ネットワークは非常に弱かったことが分かり、このことは z 軸方向（トンネルの軸方向）の座標推定精度からも確認できる。

5. 球形ターゲット

これまで計測点に設置する反射ターゲットは円形のものをしていた。しかし、トンネル内における計測では撮影条件の制限が多いため、トンネル軸方向の座標推定精度が低下する傾向がみられた。そこで、反射ターゲットを球形にして強い撮影ネットワークを得ることで、座標推定精度を向上させることができるのではないかと考えた。

ここでは、球形ターゲットを用いた際の精度を検証するために室内実験を実施した。実験では円形ターゲットと球形ターゲットをそれぞれ 20 個設置して撮影条件の違いによる精度の比較を行った。撮影条件は次の通りである。

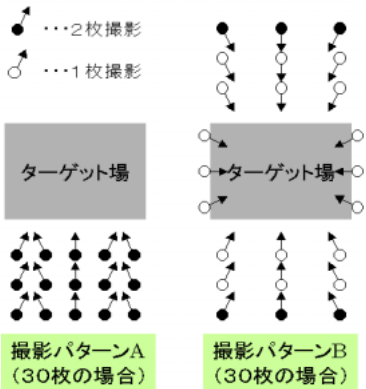


図1 撮影パターン

- (1) 円形ターゲットをパターン A で撮影
- (2) 球形ターゲットをパターン A で撮影
- (3) 球形ターゲットをパターン B で撮影

解析は(1)、(2)、(3)それぞれのパターンについて画像枚数を 18 枚、24 枚、30 枚と変えて、計 9 パターン行った。そのうち画像枚数 30 枚の場合の解析結果を表 1 に、画像枚数と座標推定精度の関係を図 2 に示す。

	(1)円形ターゲット (撮影)パターンA	(2)球形ターゲット (撮影)パターンA	(3)球形ターゲット (撮影)パターンB
画像枚数	30枚	30枚	30枚
画像面上誤差 [μ m]	0.5776	2.0110	2.4469
座標推定精度[m.m]	X軸方向 (左右方向)	0.1202	0.6379
	Y軸方向 (上下方向)	0.0546	0.1919
	Z軸方向 (奥行き方向)	0.1762	0.6350
	3方向平均	0.1271	0.4981
ネットワーク係数q	0.9902	1.1084	0.6223

表1 解析結果(30枚)

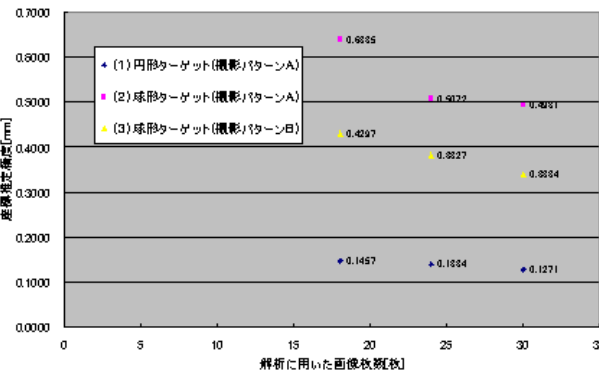


図2 画像枚数と座標推定精度の関係

6. まとめ

球形ターゲットの特性を生かし広範囲からターゲットを撮影することにより、座標推定精度を上げることができた ((2)と(3)の比較)。しかし、球形ターゲット自体の完成度が低いこともあり、正確な画像上座標が得られず、結果として円形ターゲットを用いた場合の座標推定精度を上回ることができなかった ((1)と(3)の比較)。これについては、球形ターゲットを改良することによって精度の向上が見込まれる。

参考文献

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，第 11 号，1997