

京都大学工学部 学生会員 ○奥田友晴
 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

1. はじめに

トンネル施工においては工事着手前の事前調査で地山全ての詳細な状態を正確に把握するのは非常に困難であり、掘削の進行に伴い変化する状態を切羽観察により把握し、設計されたトンネル支保工の妥当性を検討し、工事の安全性及び経済性を確保していかなければならない。近年デジタルカメラやパソコンの普及や、切羽遠方においてリアルタイムで計測ができるという利点から、デジタル画像による画像計測を用いてトンネル坑内の計測が行われている。しかし、従来の手法では解析をするにあたり施工現場における計測点の概略値が必要となり、作業の簡便性および迅速性が損なわれるという問題があった。そこで本研究では、現場で概略値を計測することなくトンネル切羽不連続面上の任意点の3次元座標を計測するという新しい手法を提案し、この計測システムの精度と適応性について検証した。計測手順については図1に示す。本研究の手法で不連続面上の任意点の3次元座標を計測することにより、不連続面の平面方程式が決定し、トンネル切羽の評価項目中の走向・傾斜の評価が可能になる。

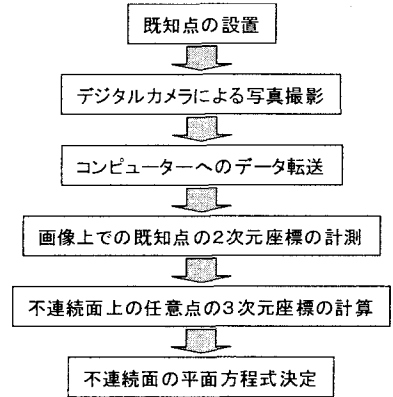


図1 計測作業の流れ

2. 計測法の概要¹⁾

本手法の基礎となる理論は被写体の切羽不連続面上の計測点、デジタル画像に写された計測点像、およびレンズの中心が一直線上にあるという幾何学的条件であり、この条件により導かれるのが共線条件式である（図2）。

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

この共線条件式を用いれば、画像に写された既知点から、撮影時のカメラの位置と傾きを求めたり（後方交会法 図3）、異なる位置で撮影された2枚以上の画像から、切羽上の任意の3次元座標を求めたりすることができる（前方交会法 図4）。共線条件式は未知数に関して非線形であるため、従来はテーラー展開をすることによって線形化するという手法を用いていた。しかし、この従来の手法では未知数の初期値とするため現場において概略値を計測する作業が必要であった。そこで本研究では、テーラー展開を用いて線形化することなく、次に示す射影変換式²⁾の係数との対応関係を考えることで非線形の共線条件式を線形化し未知数を求めた。

$$x = \frac{A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4}{A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8}$$

計測点1点について x, y に関する2本の式ができる。

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{x}{c} & \frac{x}{c} & \frac{x}{c} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & \frac{y}{c} & \frac{y}{c} & \frac{y}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x \\ -c \\ -y \\ c \end{bmatrix}$$

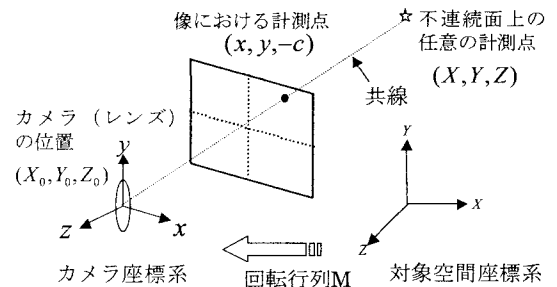


図2 共線条件

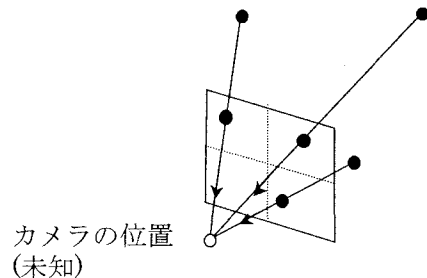


図3 後方交会法

よって $A_1, \dots, A_{11}$ 11個の未知数を得るためには3次元座標値が既知である6点が必要である。既知点6点以上の点についての連立方程式に対して最小二乗法により $A_1, \dots, A_{11}$ が求まり、未知数の対応関係からカメラの位置と角度を求めることができる。

次に切羽上の任意の3次元座標を求める前方交会法について述べる。前式において未知数であった $A_1, \dots, A_{11}$ をここでは既知数として与え、今回は未知数を不連続面上の任意の点 (X, Y, Z) とした。

$$\begin{bmatrix} A_1 + \frac{x}{c} A_9 & A_2 + \frac{x}{c} A_{10} & A_3 + \frac{x}{c} A_{11} \\ A_5 + \frac{y}{c} A_9 & A_6 + \frac{y}{c} A_{10} & A_7 + \frac{y}{c} A_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{x}{c} - A_4 \\ -\frac{y}{c} - A_8 \end{bmatrix}$$

このように、線形化した共線条件式を新たに未知数と既知数を入れ替えて解くことにより、未知数である対象点の3次元空間座標 (X, Y, Z) を求めた。1つの写真について式が2本できるので、3個の未知数を得るためには、写真が最低2つ必要である。写真2つ以上についての連立方程式に対して最小二乗法により (X, Y, Z) が決定する。

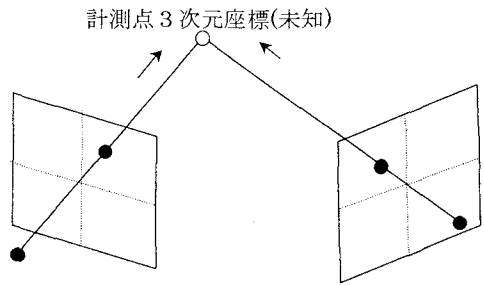


図4 前方交会法

2. 計測システムの精度検証実験及び解析結果

3次元座標が予め計測されたターゲットを室内に設置し、274万画素のデジタルカメラ (NIKON D1) に18mmのレンズを搭載したもので、約10mの距離から撮影を行った。次に撮影した各写真について3次元座標がわかっている6点で本手法の後方交会法を行い、続いてその写真を用いて任意の計測点に関して前方交会より3次元座標を求めた。また、予め計測しておいた3次元座標を真値として、本手法によって算出された計測点の値との差をとり誤差とした。図5は解析に用いた写真の枚数と算出される3次元座標の誤差との関係である。写真の枚数によって計測精度が変化するものの、約3~7mmの誤差の範囲で計測を行うことができる。これは不連続面の走向・傾斜を評価する上では十分な精度であると考えられる。尚、3枚以上の写真の場合に精度が劣化している原因は、撮影箇所を3カ所に限定しているためであり、様々な位置から撮影することにより、精度をさらに向上されることが可能であると考えられる。

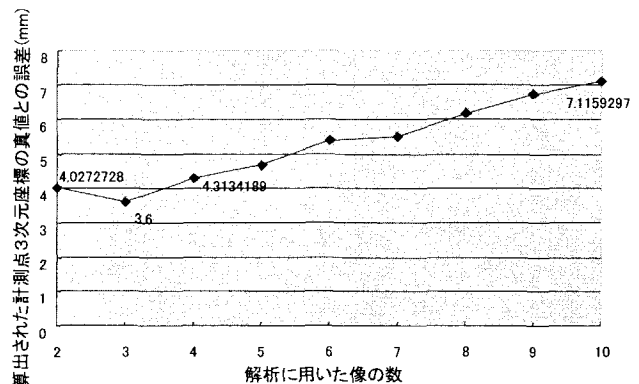


図5 解析に用いた写真の数と算出される3次元座標の真値との誤差の関係

3. まとめ

本研究では、現場での概略値計測という作業なしに、画像計測を用いて不連続面上の任意計測点の3次元座標を計測するという手法を提案し、その精度について検証した。その結果、不連続面の走向・傾斜の評価に十分利用できる精度であるという結論を得た。しかし、これは理想的な状態で画像計測が行える場合であり、実際にはレンズひずみの影響や、現場における既知点の配置方法などを考慮する必要がある、それについては今後の課題とする。この研究によりデジタル画像を用いた不連続面の走向・傾斜の評価が可能になり、さらには切羽評価の別の項目にも適応され、最終的にデジタル画像を用いた全体としての新しい切羽評価システムが構築されていくであろう。

参考文献

- 1) 秋本圭一：情報化施工のためのデジタル画像計測法の開発、京都大学博士論文、2002
- 2) 森忠次・石原藤次郎：測量学2 応用編、丸善株式会社、1981