

# 画像計測法のトンネル内空形状計測への応用

秋本圭一<sup>1</sup>・服部進<sup>2</sup>・大西有三<sup>3</sup>・三浦悟<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 四国職業能力開発大学校助教授 制御技術科(〒763-0093 丸亀市郡家町3202)

<sup>2</sup>正会員 工博 福山大学教授 工学部情報処理工学科(〒729-0292 福山市学園町1)

<sup>3</sup>正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>4</sup>正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所(〒182-0036 調布市飛田給2-19-1)

トンネル内空形状の計測に、デジタルカメラを用いた画像計測法を適用した。画像計測法自体はほぼ完成した技術であるが、トンネルへの適用方法は確立されていない。そこで撮影方法やターゲットの配置に工夫を行い、実トンネルで実験した。対象の直径は約7mで、長さ15mの範囲に対して1m格子に反射ターゲットを貼り、デジタルカメラで撮影した。同時にトータルステーションで観測した検証点の座標と画像計測の結果とを比較した。その結果、両者の差の2乗平均は0.548mmであり実用的な精度が確認できた。トンネルへの応用についての実用的な知見および変位計測の可能性についても述べた。

**Key Words :** tunnel profile measurement, vision metrology, photogrammetry, digital camera, bundle adjustment

## 1. はじめに

トンネル掘削にNATM工法が広く用いられるようになったが、この方法は内空変位を精密に、かつ頻繁に計測することが必須である。内空変位の計測には従来コンバージェンスメジャーやトータルステーション(以下TS)が使われてきた<sup>1)2)</sup>。コンバージェンスメジャーはひとつの断面の3点にピンを固定し、その間の距離を精密に計測するものである。その測定精度は最高で0.2mm程度といわれるが、トンネル内の変位を3次的に求めることはできない。TSはより汎用性の高い測量機である<sup>3)</sup>。トランシットやTSを使った計測には歴史的蓄積があり、十分注意を払えば必要な精度で対象点座標を得ることができる。しかし測定時間・労力の上から測定点密度は限られていて、比較的少数の観測値で満足しなければならなかった。これに対し最近デジタルカメラを用いた画像計測法が適用できる環境が整った<sup>4)5)</sup>。

画像計測法はもともと近接写真測量として、乾板を使うステレオ方式で実用化され、トンネル内空の計測も試みられた。1950年代から大型の計測用カメラを使った精密工業計測技術の開発がはじまり、1970年代には大型パラボラアンテナ、船舶、航空機などの精密形状計測に適用された<sup>6)7)8)</sup>。最高で10mに対して20~30 $\mu$ mの3次元計測精度を達成しているが、フィルムの現像が必要なため即時性を要求される土木計測には普及しなかった。

しかしその後デジタルカメラとパソコンが普及したことにより大型構造物の寸法形状測定に应用されるようになった<sup>9)10)11)</sup>。現在のところ計測精度は代表寸法10mの物体に対し、条件によるが0.3~1.0mmである<sup>12)</sup>。画像計測法では対象物体に反射ターゲットを多数貼る必要があるが、そのため高い密度で面的な計測が可能である。さらに画像処理を使った即時的な現場計測ができること、数学的な基礎が明確で測定値の精度が理論的に算出できることなど優れた点を有している。

著者らはすでにこの方法を工場内に設置された構造物の形状測定に適用し、実用的な精度がえられることを確認している<sup>12)13)</sup>。今回この方法をトンネル内空形状の計測に応用した。工業製品の寸法計測と比べてトンネルの場合の問題点は、対象がより大きいこと、撮影場所の制限が大きいこと、径に比して長さが長いこと、外側から全体を覆うように撮影(収束撮影)できないことなど、撮影形態に関する事柄である。これらの問題が計測結果にどのように影響するか調べるために実験を行った。直径約7mのトンネルの長さ15mを計測実験の対象としてその内壁面にターゲットを貼り、デジタルカメラで撮影した。同時に比較用としてTSによっていくつかの点を観測した。両者を比較した結果、その3次元座標の差の平均は約0.5mmであった。

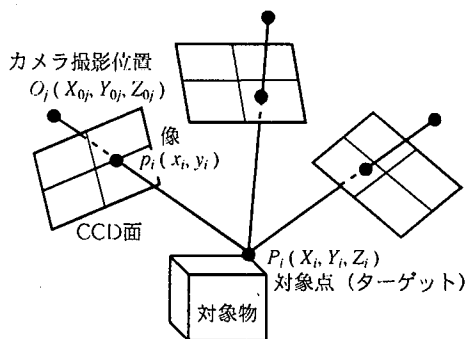


図-1 画像計測法の原理

本報告では内容を閉じたものとするため、まず第2章で必要な範囲で画像計測法の原理を述べる。次に第3章に解法を示し、第4章で実際の手順を説明する。第5章に実験結果を述べる。

## 2. 画像計測法

画像計測法の原理は次のようである<sup>14)</sup>。図-1に示すように計測点に反射ターゲットを貼り、対象をいろいろな方向からストロボを用いて収束撮影し、観測のネットワークを作る。それぞれの対象空間点  $P_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots$ ) が複数の画像  $j$  ( $j=1, 2, 3, \dots$ ) に写るように撮影する。ターゲット  $P$  と画像点  $p$  とカメラのレンズ中心  $O$  が一直線上にあるという条件 (共線条件) を使い、共線条件から観測方程式を立てる。求めるものはターゲットの対象空間座標であるが、これ以外に CCD カメラの外部標定要素 (撮影位置と姿勢) と内部標定要素 (後述の 8 個のカメラパラメータ) も未知である。これらを未知パラメータとする観測式を最小 2 乗法で調整し、すべてのパラメータを同時に求める。CCD の画面中心を原点とした画像座標系を  $x, y$  とすると、ターゲットの対象空間座標  $P (X, Y, Z)$  と画像座標  $p (x, y)$  の関係は式(1)の共線条件式で表される。

$$x + \Delta x + c \frac{M_{11}(X - X_0) + M_{12}(Y - Y_0) + M_{13}(Z - Z_0)}{M_{31}(X - X_0) + M_{32}(Y - Y_0) + M_{33}(Z - Z_0)} = 0 \quad (1a)$$

$$y + \Delta y + c \frac{M_{21}(X - X_0) + M_{22}(Y - Y_0) + M_{23}(Z - Z_0)}{M_{31}(X - X_0) + M_{32}(Y - Y_0) + M_{33}(Z - Z_0)} = 0 \quad (1b)$$

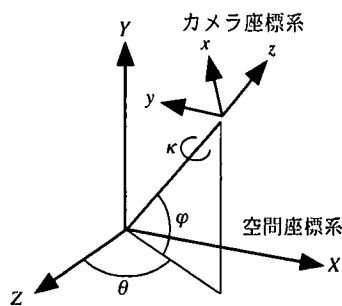


図-2 カメラの回転

ここで  $(X_0, Y_0, Z_0)$  は撮影点の座標、 $M=(M_{ij})$  はカメラの対象空間座標系での回転行列、 $\Delta x$  および  $\Delta y$  は主点座標を含めたレンズひずみの項、 $c$  は画面距離である。カメラの回転行列  $M$  は、空間座標系原点からの水平角  $\theta$ 、鉛直角  $\varphi$ 、およびカメラ光軸回りの回転角  $\kappa$  の 3 つの角 (図-2 参照) から作られる  $3 \times 3$  の行列である。レンズひずみのモデルにはよく知られている式(2)を用いた<sup>15),16)</sup>。

$$\Delta x = -x_p + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) (x - x_p) + P_1 (r^2 + 2(x - x_p)) + 2P_2 (x - x_p) (y - y_p) \quad (2a)$$

$$\Delta y = -y_p + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) (y - y_p) + 2P_1 (x - x_p) (y - y_p) + P_2 (r^2 + 2(y - y_p)) \quad (2b)$$

ここで  $(x_p, y_p)$  は主点 (レンズ中心から CCD 面に下ろした垂線の足) の画像座標、 $r^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2$  であり、レンズひずみの中心と主点位置が一致すると仮定している。  $K_1, K_2, K_3$  は放射方向ひずみの係数、 $P_1, P_2$  は接線方向ひずみの係数である。内部標定要素は  $x_p, y_p, c, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2$  の計 8 個である。

共線式(1)は強い非線型性があるので、線形化して繰り返し最小 2 乗法で解く。式(1)を近似値の周りに線形化し、

パラメータの真値 = 近似値 + 補正量

画像座標の真値 = 観測量 + 誤差

と定義して、全画像の全点について観測方程式を書くと次の形の式を得る。

$$v_0 + A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3 = e_0 \quad : W_0 \quad (3)$$

式(3)において  $x_1, x_2, x_3$  はそれぞれ外部標定要素、内部標定要素および対象点座標の補正量ベクトル

$$x_1 = \left[ \dots \Delta X_{0j} \Delta Y_{0j} \Delta Z_{0j} \Delta \theta_j \Delta \varphi_j \Delta \kappa_j \dots \right]^T \quad (4a)$$

$$x_2 = \left[ \Delta c \ \Delta x_p \ \Delta y_p \ \Delta K_1 \ \Delta K_2 \ \Delta K_3 \ \Delta P_1 \ \Delta P_2 \right]^T \quad (4b)$$

$$x_3 = \left[ \dots \ \Delta X_i \ \Delta Y_i \ \Delta Z_i \ \dots \right]^T \quad (4c)$$

( $j$ は写真番号,  $i$ は対象点番号を表す)

である。 $e_0$ は残差ベクトル,  $[A_1 \ A_2 \ A_3]$ はデザイン行列(係数行列),  $v_0$ は画像座標の誤差ベクトル,  $W_0$ は重み行列である。 $T$ は転置を表し, 添字1, 2, 3はそれぞれ画像の外部標定要素, カメラの内部標定要素, ターゲットの対象空間座標に関する諸量であることを示す。 $x_1$ の要素は1枚の写真について撮影位置および角度の計6個である。 $n$ 枚の写真では $6n$ 個となる。 $x_2$ の要素は8個である。 $x_3$ の要素は1点につき3個であり,  $m$ 点では $3m$ 個となる。例えば50個のターゲットを30枚の写真に撮ったとき, 未知数の数は $30 \times 6 + 8 + 50 \times 3 = 338$ 個であり, 全点が全写真に写ったとすると観測方程式の数は $50 \times 30 \times 2 = 3000$ になる。既知数はターゲットの像の画像座標である。 $[A_1 \ A_2 \ A_3]$ の大きさは $3000 \times 338$ となるが, そのほとんどの要素は0の粗な行列である。座標の観測値に加わる誤差は互いに共分散を持たないと仮定すると観測の事前分散共分散行列は対角行列  $E\{ee^T\} = \sigma^2 I$  で表される。ここで $E$ は期待値,  $I$

は単位行列である。重み行列  $W_0$ は  $W_0 = \frac{1}{\sigma^2} I$  で定義する。このようにカメラパラメータを含む全ての未知数を一つの連立方程式にまとめ, 一挙に解く方法はセルフキャリブレーション付バンドル調整法と呼ばれている。

さて, 共線式(1)または線形化された観測方程式(3)は変数間の相対的な関係しか記述しておらず, 絶対座標およびスケール(縮尺)に関する知識は何も入っていない。すなわち式(3)から対象点の絶対座標を求めることはできない。一般に形状計測では対象の3次元形状のみが問題なので, 絶対基準点を置くことは通常ない。ただしスケールだけは決めねばならないので, 長さをあらかじめ精密に測定した基準尺を何本か置き, それを同時に写真に写し込んで対象物のスケールを決める。土木測量の場合, 測地座標系での座標が必要な場合には別途基準点との位置関係を測定し, 座標変換する必要がある。基準尺を入れてスケールを決めるときは次のようにする。基準尺の長さを $s$ , 両端のターゲット座標を $(X_1, Y_1, Z_1)$ ,  $(X_2, Y_2, Z_2)$ とするとその観測式は

$$s = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}$$

と書けるから, 共線式の場合と同様に線形化し, 複数の基準尺の観測式を行列形式で

$$v_s + A_s x_3 = e_s : W_s \quad (5)$$

と書く。 $A_s$ は距離測のデザイン行列であり,  $W_s$ は重みである。重みの大きさは長さの測定値の分散の逆数を用いる。式(3)と式(5)をまとめると

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ O & O & A_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_0 \\ e_s \end{bmatrix} : \begin{bmatrix} W_0 & O \\ O & W_s \end{bmatrix}$$

と書けるので, さらにこれを

$$v + Ax = e : W \quad (6)$$

の形で表わす。絶対座標が求まらないという事実は, 数学的には連立方程式(6)の係数行列 $A$ のランク落ちとして現れる。ランク落ちの数は一般には平行移動3, 回転3, 伸縮1の合計7である。基準尺をおいた場合にはスケールが決まるので6となる。先に挙げた例では, 基準尺がないとき行列のランクは $338 - 7 = 331$ となる。いずれの場合も行列 $A$ のランク落ちが問題を興味深くする<sup>17)</sup>。

### 3. 解法

係数行列 $A$ にランク落ちがないとき, 連立方程式(6)の最小2乗解 $\hat{x}$ は, 通常の実逆行列を用いて解いた正規方程式の解

$$\hat{x} = (A^T W A)^{-1} A^T W e \quad (7)$$

で一意的に与えられる。しかし今の場合 $A$ は特異なので通常の実逆行列は存在しない。 $A$ によって張られる線形空間は縮退しているため解は一意ではない。この事態を克服するための各種の解法がある。

最も簡単な方法はランク落ちに等しい数の対象点座標を固定してランク落ちを解消し, 正規方程式を解く方法である(最小拘束法)。たとえば基準尺を入れたとき, ランク落ちは6であるから, 一つの点の $(X, Y, Z)$ , もう1点の $(X, Y)$ , あとひとつの点の $Z$ を固定する。

もう一つの方法は一般逆行列を用いて

$$\hat{x} = (A^T W A)^- A^T W e \quad (8)$$

として計算する方法である（一般逆行列法）。これら2つを含む最も汎用的な方法は、 $A$ の行ベクトルが張る空間  $V \equiv R(A^T)$ の補空間  $V^c$ を指定する方法である（内的拘束法）。解の不定性の原因は  $V^c$ のランクが0ではなく、6または7の次元を有することである。最小拘束法および一般逆行列法を含む各種の解法は、 $V^c$ の基底の取り方が違うだけである。 $V^c$ の一つとして、 $A$ の零空間  $N(A)$ がある。画像計測の場合、その性質により  $N(A)$ の6または7本の基底ベクトルを容易かつ解析的に作ることができる<sup>18)</sup>。この基底ベクトルを並べて作った行列を  $G$ とし、 $Gx=0$ という拘束を式(6)につけ加える。このとき最終的に最確値およびその分散共分散行列は

$$\hat{x} = (A^TWA + GG^T)^{-1}A^TWe \quad (9)$$

$$\Sigma_{\hat{x}} = \sigma_0^2 \left\{ (A^TWA + GG^T)^{-1} - G(G^TGG^T)^{-1}G^T \right\} \quad (10)$$

として与えられる<sup>19)</sup>。基底の取り方によって解の値は異なるが、対象物形状としては互いに相似である。しかし最確値の分散は異なる<sup>20)</sup>。

複数の解  $x$ のあらかず形状が互いに相似であるにもかかわらず、その分散が異なる理由は次のように理解できる<sup>13),17),20)</sup>。ランク落ちのある係数行列  $A$ をもつ連立方程式

$$Ax=y, \quad A: m \times n (m > n), \text{rank}(A)=r < n, \quad x: n \times 1, \quad y: m \times 1$$

を考える。最小2乗解は  $Ax=y_0$  ( $y_0$ は  $A$ の張る空間への  $y$ の直交射影)を満たす。 $A$ にランク落ちがない場合、このような  $x$ は一意的に決まる。なぜなら  $A$ の  $n$ 本の列ベクトル  $a_i (i=1, \dots, n)$ は互いに線形独立だから、それらの線形結合で  $y_0$ を表す表し方は唯一だからである。しかし今の場合  $a_i$ のいくつかは独立でないため  $Ax=y_0$ なる関係を満たす  $x$ は無数にある。というのはある解  $x$ が得られたとき、 $A$ の零空間  $N(A)$ に属するベクトル  $x_0$ をこれに加えた  $x_1=x+x_0$ もまた解だからである。二つの解ベクトル  $x$ と  $x_1$ はともに最小2乗解であるが、明らかにそれらの長さは異なる。ところで解ベクトルの長さ(の2乗)は最確値の分散の和に等しい。なぜなら

$$E\{\|x\|^2\} = E\{x^T x\} = E\{x_1^2 + \dots + x_n^2\} = \sigma_{x_1}^2 + \dots + \sigma_{x_n}^2$$

だからである。すなわち同じ最小2乗誤差を与える解であっても、その解ベクトルの長さすなわち最確値の分散の和は異なる。よって最小2乗解のうち、解ベクトルの長さが最も短いものが最小平均分散を与える解である。このような解は最小2乗最小ノルム解と呼ばれ式(9)がそれを与える式である。式(9)

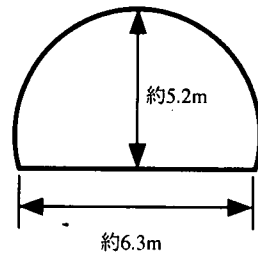


図-3 トンネル断面の概略

は  $A$ の最小2乗最小ノルム型一般逆行列（これはムーアペンローズ型一般逆行列と呼ばれる） $A^+$ を用いた解  $x=A^+y$ と同値である（ただし計算時間は式(9)の方がはるかに速い）。

さらにここで解  $x$ が  $x_1, x_2, x_3$ の3つで構成されていることを考慮する。われわれの最終目的は対象点座標  $x_3$ を求めることにあるから、 $x$ 全体の平均分散を最小にするよりもむしろ  $x_3$ のみの平均分散を最小にすべきであろう。このような解は次で与えられる。

$$\hat{x} = (A^TWA + BB^T)^{-1}A^TWe \quad (11)$$

$$\Sigma_{\hat{x}} = \sigma_0^2 \left\{ (A^TWA + BB^T)^{-1} - G(G^TBB^TG)^{-1}G^T \right\} \quad (12)$$

ここで  $B$ は行列  $G$ のうち  $x_3$ に対応する行のみ取り出し、残りを0と置いた行列である。式(11)は式(9)を  $Bx=0$ という拘束のもとに解いた最小2乗解になっている。つまり最小2乗解のうち  $B$ で張られる空間に直交するものが求める解である。

以上の操作は  $A$ のランク落ちによって生ずる座標設定の自由度を利用して、対象点座標の分散が最小になるような座標系を選定していることになる。

#### 4. 測定作業

本章では、画像計測作業において留意すべき点をトンネルへの応用という観点で述べ、実際にとった手順を説明する。まず今回の対象としたトンネルの断面概略寸法を図-3に示しておく。本トンネルは鉄道用であるが、現在は使用されていない。

##### (1)カメラ

撮影に用いるデジタルカメラはCCDサイズが大きく、解像度の高いものを用いる必要がある。CCDのサイズは、使用するレンズとともに1枚の写真に写せる範囲を決める。大きいものほど広い範囲を写せ



図-6 ターゲット配置図

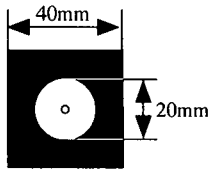


図-4 反射ターゲット



図-5 基準尺

るので写真の接続枚数が少なくなり、精度確保の上で有利である。解像度の高さは、ターゲット像の重心座標計算精度に関わる。また絞りやシャッター速度、感度などが手動で設定できる必要がある。これらの条件を満たすカメラが最近安価で入手できるようになった。できればモノクロ仕様が望ましいが、これは現在ではほとんど市販されていない。我々が使用したのはKODAK DCS660である。画素数は約600万画素(3040×2008)、CCDサイズは27.6mm×18.4mmである。300万画素(2000×1500)クラスのカメライはより選択肢が広く、工業品の寸法計測に十分使用できるが、トンネル内空計測に用いるには画角が小さいと思われる。

## (2) レンズ

レンズの選択は、写せる範囲と画質および精度に関わる。短焦点レンズ(広角レンズ)を用いると1枚の写真に広い範囲が写せるが、その反面レンズひずみが大きくなる。また画角が広いため、正対した面を写すときでも、画面周辺のターゲット像が暗い楕円になるという意味で画質が落ちる。これに対し、長焦点レンズはその逆である。均質で明るいター

ゲット像を得るためには、離れた場所から長焦点レンズで撮影することが望ましい。しかしトンネルの場合、後ろに下がれないので撮影範囲を確保するには短焦点レンズを用いなければならない。今回用いたのはNikon 20mmレンズである。工業製品の計測では28mmレンズが良く用いられるが、ここでは画角が狭すぎた。20mmレンズでは画面周辺部のひずみは50画素以上に及ぶため、それが計測精度に及ぼす影響はより大きい。現在用いているレンズひずみモデルの妥当性の再検討やオフライン校正法の併用などは今後の課題である。

## (3) ターゲット

測定用ターゲット(図-4)は材質と反射面の直径が重要である。材質はストロボ光を入射方向へできるだけ多く返すものが望ましい。我々は国内外からサンプルを得て入射角度に対する反射光量を測定し、最も優れた反射シートを採用した。このシート裏面を粘着加工し、表面に無反射黒色塗料を印刷して使用している。ターゲット面と光線が直交した状態から約60度傾いても使用できる。円形反射面の直径は測定条件によって適宜決める。レンズおよびカメラ

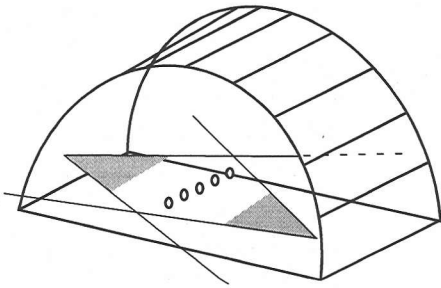


図-7 路上ターゲットの撮影

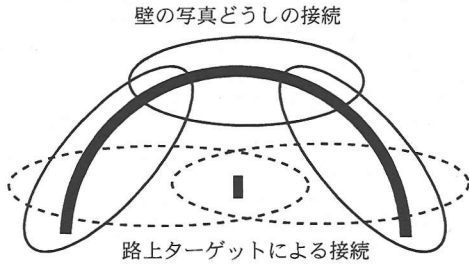


図-8 路上ターゲットによる写真接続の強化

を決めたら、測定距離をもとに、その像がCCD面上に直径5~15画素で写るような径を選ぶ。今回の実験では20mmにした。大きく写りすぎると光があふれてしまい（ブルーミング）、かえって良くない。ターゲットの中心に直径1mmの円を印刷したのは、検証用にトータルステーションで観測するときの視準用である。

#### (4)基準尺

今回用いた基準尺（図-5）は9本で、予め両端ターゲット中心間距離を0.005mmの精度（測定機の最小目盛）で測定してある。長さはいずれも約1mである。気温変化による伸縮の影響を軽減するため、ロッド部はカーボンにした。基準尺の長さおよび配置、例えば短いものを多数入れるか長いものを少数入れるか、それらをどこにどのように置くか、が測定結果にどの程度影響するかはレンズひずみや撮影形態とも関係して複雑である。我々はまだその詳細を把握していない。ただし製作およびハンドリングの観点からして長いものを作るのは難しいので、実用的には1~2m程度の基準尺を今後も使用することになるであろう。

#### (5)ターゲット密度

ターゲット配置を図-6に示す。この図はトンネル壁面を展開して上から見たものである。格子のピッ

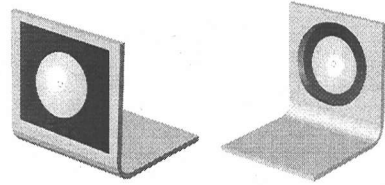


図-9 両面ターゲット

ちは1mで、全長は15mである。画像計測法では計りたい位置だけではなく、それ以外の多数の場所にもターゲットを貼らなければならない。その理由は、レンズひずみの同定と写真接続の強度確保のためである。多ければ多いほど良いが、その分ターゲットを設置する工数および画像処理にかかる労力は大きくなる。少ないと十分な精度が得られない。また1枚の写真に写る範囲に一定以上の像が必要である。ターゲット密度は対象ごとに、現場の条件と経験に基づいて決めているのが現状である。今回我々はトンネル内面に1m間隔で貼った。その結果、1枚の写真に平均44点のターゲット像が写った。結果的には十分だったと考えている。

#### (6)路上ターゲット

内壁とは別に、路上中央に仮設ターゲットを置いた（図-7参照）。これは複数の写真に共通して写る点を増やして写真接続強度を増すための工夫である。内壁を順次撮影してゆくと（次項）左右の壁の写真は天井部の写真によって接続され、関係づけられる。すなわち写真接続の輪は開いている（図-8参照）。道路中央にターゲットを置いて、両壁面の写真に同一ターゲット像を入れれば、それらを直接関係づけることができるので、天井からの接続とあわせて接続の輪が閉じ、強度が上がる。両側から写せるようにするため、両面ターゲット（図-9）を用いた。これは反射面の直径10mmのターゲットを2枚背中合わせに貼り付け、開孔したアングルに取り付けたものである。

#### (7)撮影形態

対象物をどこからどのように撮影するかという問題である。与えられた目標精度を達成するために必要な写真枚数とそれらの撮影場所を求める問題はFirst Order Designと呼ばれるが、まだ解決されていない。一般には対象物をその外側から全体を収めるようにして多数の方向から撮影する（収束撮影）。十分な重複

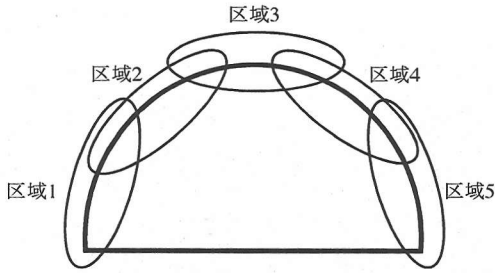


図-10 撮影区域の分割

度をもって全体を覆うように撮影できれば強いネットワークができ、高い精度が得られる。しかしトンネルの場合、これとは逆に、内側から外に向かって放射状に撮影することになること、撮影場所が限られること、細長い形状であるため全体を収められないことと言う困難さがある。今回は次のように撮影した。長さ15mの対象範囲を仮想的に幅5mの3つの領域に分割し、さらに1つの領域を5つの区域に分けた(図-10)。この区分は現場にて写る範囲を確認して決めた。そして一つの区域ごとに左右から2枚ずつ計4枚、1領域で22枚(壁の正面像2枚を加えた)、そして3領域で総計66枚の画像を得た。図-11に概略を示す。区域および領域はそれぞれ50%程度重複した。この66枚の画像セットを以後<66>と書く。

**(8)撮影条件**

撮影に際しては暗い背景にターゲット像を白く浮か上がらせる必要がある。それは画像処理でターゲット像の重心位置を求めるためである。被写界深度(ピントの合う距離範囲)を深くするため絞りはいっぱい(ƒ22)、ピントは無限大に合わせて動かぬようテープで巻いて固定した。撮影中に動くとき内部標定要素が変化してしまうからである。シャッター速度は1/125、ISO感度80に設定した。これらはストロボの能力や対象面との距離、周囲の明るさなどによって上述のような像が得られるよう変更する必要がある。テスト撮影した画像を確認して一連の撮影に入った。1枚撮影するごとにカメラを光軸の周りに90度ずつ回転させた。これは、一つの点の像の位置を複数の写真で分散させ、レンズびずみパラメータの同定精度を上げるためである。

**(9)ターゲット座標算出**

写真の処理の第一段階はターゲット座標の算出である。ターゲット座標の計測精度が本方法の精度に大

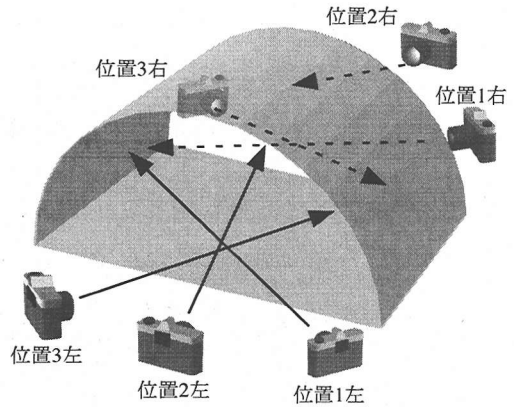


図-11 領域の撮影形態のイメージ

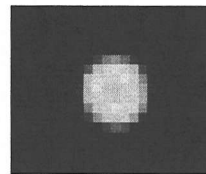


図-12 ターゲット像の一例

きく影響する。まず得られた写真からカラー情報を破棄して256階調のグレースケール像に変換する。次にターゲット像のCCD面上での中心位置座標を計測する。ストロボ撮影によってターゲットは黒い背景に白い円または楕円として写る。像の一例を図-12に示す。代表的な像をいくつか選び周囲の背景明度とターゲット中心部の明度を調べ、明度のしきい値を決定する。そして全ての像に対して像を含む一定の領域を切り出し、その中でしきい値以上の明度をもつ範囲の重心座標を計算する<sup>16)</sup>。今回の場合、切り出し領域は32画素×32画素の正方形とし、しきい値は20とした。

**(10)写真点の認識と写真接続**

重心位置の計算と同時にターゲットの番号づけを行う。背景が暗いので画像からどの像がどのターゲットなのか認識することはできない。そこで予め、トンネル壁面のところどころに反射シートで作った目印を置いておき、各写真に写った目印の像をもとにターゲットを同定した。次に各写真に対して外部標定(撮影位置・角度)の概略値を初期値として入力する。繰り返し計算の収束範囲は比較的広いので、写真を見て概略値を設定すれば十分である。画像処

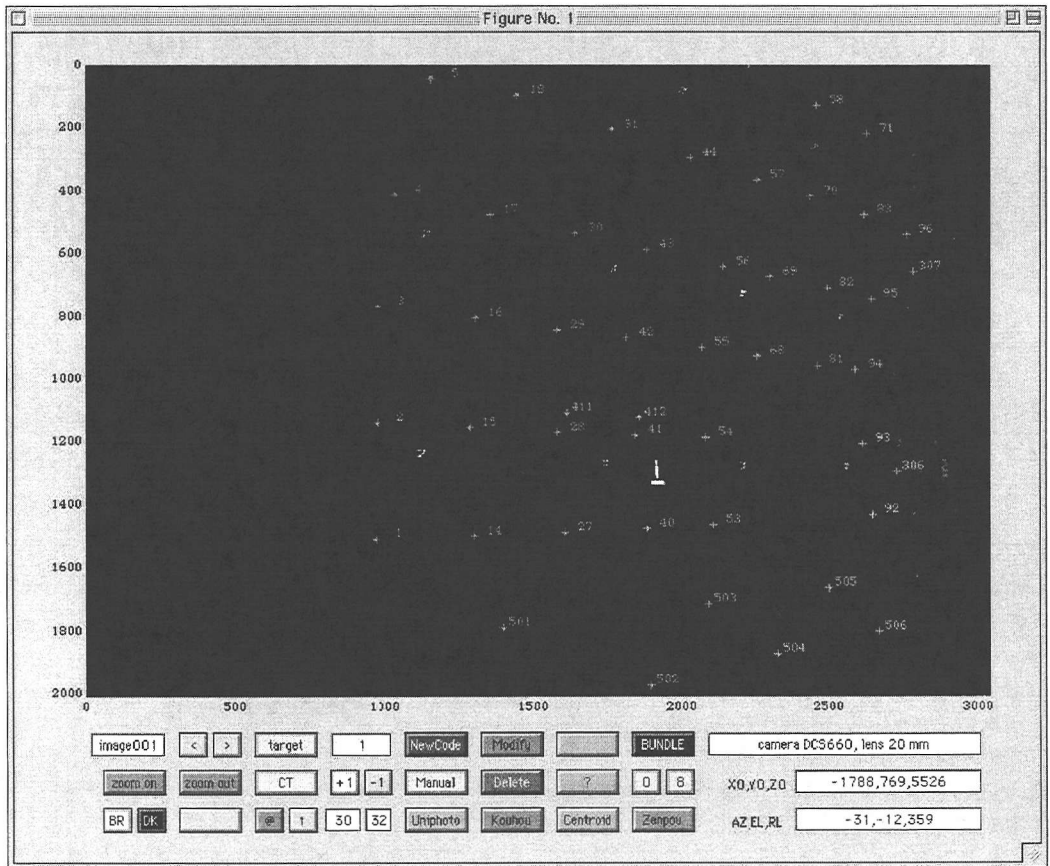
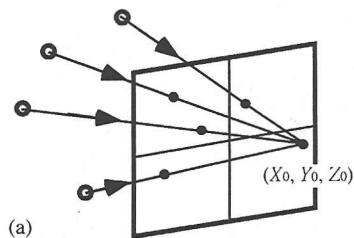


図-13 写真の処理画面例

理画面の例を図-13に示す。写真の接続は次のようにした。まず最初の2枚に共通に写った数点(3点以上)のターゲットの概略3次元座標を与える。実際には巻尺で計った値を6点入れた。これを用いて2枚の写真の外部標定を後方交会(図-14a)で求める。次にこの2枚に共通に写った残りの点の3次元座標を前方交会(図-14b)で算出する。以上で得られた点の座標によって3枚目の写真の外部標定を求める。以下これを繰り返す。数枚の処理が終わればその時点までの写真で調整計算をおこなう。これら一連の作業には労力を要する。今回の66枚の写真に対して所要時間はおよそ3時間であった。我々は現在この作業の自動化を進めており<sup>21)</sup>、手順としてはおおむね完成しているので別途報告したい。

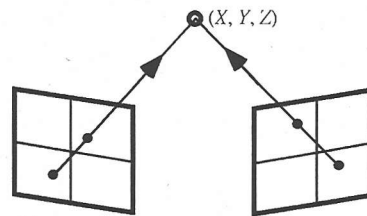
#### (11) 検証点の観測

画像計測の結果を検証するため、いくつかのターゲットの3次元座標をTSで観測した。用いたのは



(a)

後方交会：座標既知の複数の対象点の像から写真の外部標定を求める



(b)

前方交会：外部標定既知の2枚以上の像から対象点の3次元座標を求める

図-14 前方交会と後方交会



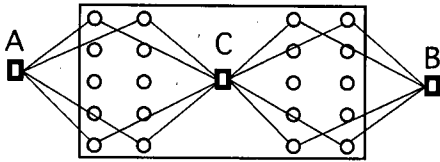


図-15 検証点のTS観測

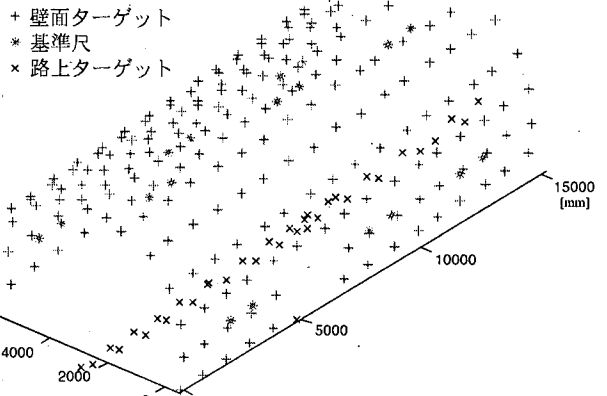


図-16 得られた形状

表-1 写真66枚での計算結果

写真枚数	66枚
ターゲット数	272点
全写真点数	2932点
基準尺の本数	9本
写真面上での残差	$\sigma_0$ 0.0009632mm
座標推定精度	$\sigma_x$ 0.3257mm $\sigma_y$ 0.1718mm $\sigma_z$ 0.2450mm $\sigma_{XYZ}$ 0.2554mm
収束までの繰返し数	6回
繰返し1回の計算時間	約75秒(450MHzPC)

## (12) 座標変換

画像計測で得たターゲット座標と、TS観測によるそれとをどのように比較するかという問題である。調整計算によって得られた形状はいずれも絶対座標ではない。すなわち形状としては相似であるが座標の値は異なっている。そこで両者を比較するとき、一方を直交変換し、残差の2乗平均の平方根(RMS)をもって両者の差の平均とした。すなわち比較した点を $1, 2, \dots, k$ とし、TS観測値を $X_i'$ のように表すと

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (X_i - X_i')^2}, \quad s_y, s_z \text{も同様} \quad (13a)$$

$$s_{XYZ} = \sqrt{\frac{1}{3}(s_x^2 + s_y^2 + s_z^2)} \quad (13b)$$

がそれぞれ座標ごとの差の平均および全体の差の平均である。

## 5. 測定結果

### (1) 測定結果

調整計算の結果を表-1に、その結果得られたターゲット位置を図-16に示す。

前章で述べた写直接続の段階で番号のつけ間違いや、外部標定の入力ミスなどの大誤差は容易に除去できる。写真ごとの接続ができておれば多少の大誤

SOKKIA NET-2で、その精度は角度2秒、距離±(1mm + 2ppm × D)である。測定点は図-6に示したように、4断面各5点の計20点である。観測は図-15に示す3箇所から行い、1つのターゲットについて2方向から観測した。それぞれ正反2回観測してその平均値をその点の観測値とした。3箇所から得た角度、距離データを元に観測ネットワークを作り、対象点座標、TS機械点座標および初期水平角度を未知数とした連立方程式を解いて各点の3次元座標を算出した。壁面に貼った反射ターゲットを直接視準したので、TSと反射面は正対しておらず、距離観測値の精度は十分ではない可能性がある。しかし、調整計算時には距離と角度の精度比に従って角度に大きな重みがつくため、実際には主として角度観測値によって座標が計算されている。このようにトンネルの場合、場所的な制約からTS観測による正確な検証用データが得にくいため、検証データ自体を複数の観測値から調整計算することによって算出する必要がある。

図6の検証用ターゲット番号

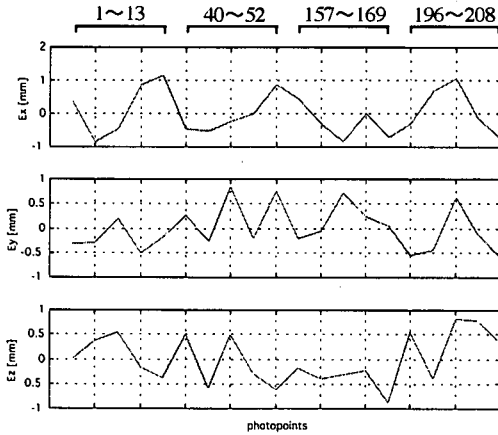


図-17 画像計測による座標とTS  
による座標との差の分布  
(Ex, Ey, Ez はそれぞれ X, Y, Z 座標の差)

差が残っていても全体の調整計算は収束する。収束した後、画面上の残差(式(3)のe)の分布を確認し、まだ残る大誤差を除去する。この時点での大誤差は、ターゲット像の不良(暗いもの、斜めに写ったもの)がほとんどである。残差の分布がほぼ一様かつランダムに分布していることを確認して計算を終了した。

写真面上での残差  $\sigma_0$  は 0.000963mm であった。残差には、仮定したモデル式(1)(3)の不適合を含む全ての誤差が含まれているが、それらをまとめてターゲット像の重心座標計測誤差、すなわち観測雑音として取り扱っている。1画素の大きさは0.009mmなので1/9.3画素の精度で座標を計測できたことになる。これは我々の経験では室内での工業製品の場合とほぼ同程度の値であり、遜色のない撮影ができたと言える。

座標推定精度は次のように計算した。すなわち、未知数の分散共分散行列  $\Sigma_x$  の対角項に並ぶ各対象点座標の分散を  $V_{Xi}, V_{Yi}, V_{Zi} (i=1,2,3,\dots,n)$  とすると

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{Xi}}, \quad \sigma_y, \sigma_z \text{ も同様} \quad (14a)$$

$$\sigma_{xyz} = \sqrt{\frac{1}{3} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)} \quad (14b)$$

である。すなわち画像計測による対象点X,Y,Z座標の平均精度  $\sigma_{xyz}$  は約0.255mmであった。 $\sigma_{xyz}$ を決める主要な要素は、ターゲット座標の計測推定精度  $\sigma_0$  と撮影形態(写真ネットワークの強度)である。 $\sigma_0$  が同じであったとしても、撮影形態が良ければ、す

表-2 画像計測による座標とTS  
による座標との差のRMS[mm]

$s_x$	$s_y$	$s_z$	$s_{xyz}$
0.6596	0.4541	0.5096	0.5480

表-3 異なる画像セットとその結果結果

	単位 mm		
	<66>	<36a>	<36b>
推定精度 $\sigma_{xyz}$	0.255	0.983	0.360
座標の差のRMS $s_{xyz}$	0.548	0.690	0.695
長さの差のRMS	0.788	0.943	1.038

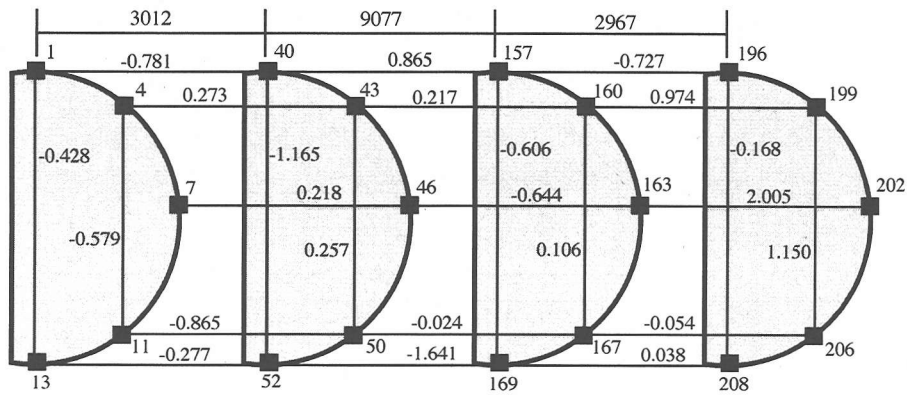
なわち一つの対象点が多数の写真にいろんな方向から写せていけば  $\sigma_{xyz}$  は小さくなる(精度が上がる)。0.255mmと言う値は十分満足できる数字である。 $\sigma_0$  が比較的大きかったにもかかわらず  $\sigma_{xyz}$  が小さくできたのは、写真枚数の効果であると考えられる。これについてはあとで考察する。

次に、検証点のTS観測値と比較する。4断面計20点について4節(12)に述べた手順で比較した。その結果を表-2に、差の分布を図-17に示す。X,Y,Z座標の差の平均は0.548mmであった。最大の差はX座標で+1.17mm, Y座標で-0.75mm, Z座標で-0.88mmであった。TS観測値自体にも0.5mm程度の誤差があると見てよいので、それを考慮すれば画像計測値は少なくともTSと同等の精度を得ていると言える。

以上はターゲットの3次元座標の比較であったが、次に距離の比較を行う。代表的な2点間の距離をそれぞれの座標計測値から計算し、両者の差を求めた。その結果を図-18に示す。断面方向8、長さ方向15の計23の距離について、差の平均は0.798mmであった。最大の差は#163~#202間の2.01mmであった。#202のターゲットは、対象の端部天井にあり画像点が他に比して少なく、かつTSでも視準しにくい点であったため差が大きくなったと推定する。断面方向の8つの距離の差の平均は0.68mm、長さ方向15の距離のそれは0.88mmであった。座標についてと同様に誤差の範囲で両者は一致していると言える。

## (2) 写真枚数の比較

写真枚数を減らしたときの結果を比較する。前章で



数字は、(写真計測値による長さ) - (TS観測値による長さ) [mm]

図-18 長さの比較

表-4 路上ターゲットの効果

画像セット	差の平均	単位 mm	
		路上Tあり	路上Tなし
<66>	全体	0.797	0.813
	断面方向	0.677	0.811
	長手方向	0.885	0.843
<36b>	全体	1.038	1.308
	断面方向	1.076	1.628
	長手方向	1.053	1.138

表-5 画像セット 36a と 36b による座標の差の RMS [mm]

$s_x$	$s_y$	$s_z$	$s_{xyz}$
0.7165	0.5414	0.7027	0.6584

述べたように各仮想区域に対して左右から2枚ずつ計4枚の写真を撮った。これを1枚ずつ取り出し左右から計2枚、1領域に対し10枚+壁正面像2枚の計12枚、3領域で総計36枚の写真の組を2組作った。これらを<36a>と<36b>と呼ぶ。そしてそれらからターゲット座標を計算し、先と同様に検証点と比較した。結果を表-3に示す。

推定精度 $\sigma_{xyz}$ はそれぞれ0.983mmおよび0.360mmであり、66枚のときより悪くなった。検証TS観測値との比較では、差の平均はそれぞれ0.690mmと0.695mmであった。長さの比較は0.943mmと1.038mmであった。 $\sigma_{xyz}$ は一般にネットワークが強いとき、一つの点が写る写真枚数(すなわち1点を通る光線の数)の平方根に逆比例して小さくなる。<66>と<36b>はこの関係を満たしているが<36a>は過大である。<36a>はネットワーク強度が落ちている可能性がある。改めて36枚の場合の撮影形態を設計すべきところである。

### (3) 路上ターゲットの効果

路上仮設ターゲットの効果を見るため、<66>と<36b>の2つの組に対し、路上ターゲットを入れないときの対象点座標を計算し、TSによる値と距離を比較した。この結果を表-4に示す。

いずれの場合も、差は大きくなる。その原因を見ると、長手方向の差はあまり変わらないのに対し、断面方向の差が大きくなっているためであることが分かる。しかもその差の大きさは<66>よりも<36b>で顕著である。以上のことより、路上においた仮設両面ターゲットは両壁面を直接接続してネットワークを強化する効果があること、その効果は写真枚数が少ない場合により大きいことが分かった。写真枚数が多いときには天井を経由する接続強度が強いためである。トンネル計測では路上ターゲットが有効であることが分かった。

### (4) 変位計測の可能性

最後に画像計測を用いて変位測定を行う場合について検討する。トンネルに限らず一般に土木施工にお

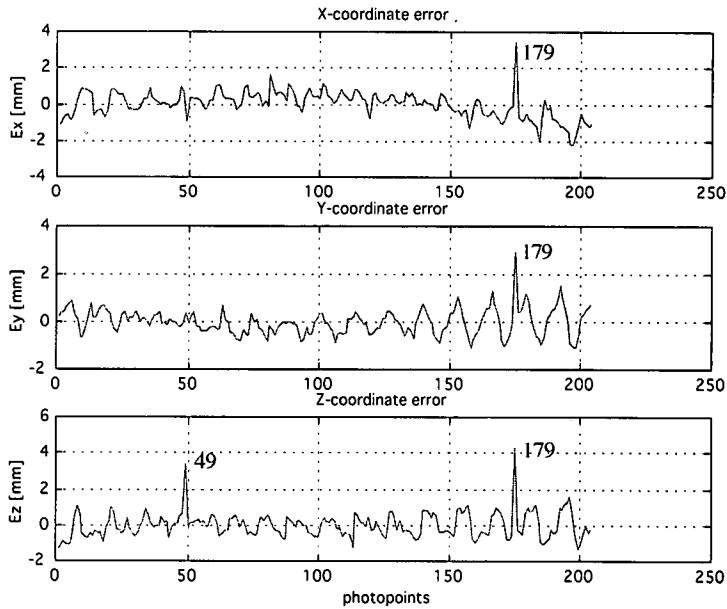


図-19 2つの画像セットによる結果の差の分布  
(Ex, Ey, Ez はそれぞれ X, Y, Z 軸の差、横軸は点番号)

いては対象物の時間的な変位を監視することが重要である。この場合には一定の期間をおいて計測し、両者での座標の差を取る。この状況を模擬したものと考えて(2)項で述べた2つの画像セット<36a>と<36b>の結果を重ね合わせて比較してみる。実際には同時の撮影であるため、両者の間に変形はない。比較結果を表-5に、差の分布を図-19に示す。両者の差のRMSは0.658mmであった。#49および#179の差が異常に大きいのは、壁面の障害物によって像の数が少ない(2点または3点)ためである。大まかな傾向としてトンネル中央部の差が小さく、両端部では大きい。これは中央部ほど写る写真の枚数が多いためであると判断できる。今の場合、一つのターゲットあたり中央では6~10枚、端部で3~6枚に写った。中央部のターゲットでは両セットの差はおおむね0.5mm以内であった。変位計測を行う場合は、目標精度によるが、1つの点を10枚程度の画像におさめることが必要であろう。詳細は今後の課題である。

## 6. まとめ

今回の目標は、画像計測法を土木現場での計測に応用する第一歩としてトンネルに適用し、実用的な精

度で内壁形状が計れることを実証することであった。事前の目標精度は1mm以内であったが、これは達成できたと考えている。同時に、トンネル計測に関する多くの知見を得ることができた。

今日、安価で高解像度のデジタルカメラが普及し始めたことによって、手軽に精細な画像情報を得ることが可能になった。ここで報告した画像計測法はその代表的な利用方法の一つである。画像計測法は原理的にはほぼ完成された技術だと言ってよいが、個々の問題に対する適用面においてはまだまださまざまな問題が残されている。土木への応用はまだ着手されたばかりであり、斜面監視、変位計測、土工量計測など今後多くの場面へ応用できる可能性がある。撮影形態やターゲット密度などまだ経験で判断するところが残されており、本報告の段階では必ずしもトンネル内面計測法を十分確立したものとは言えないが、一定の成果を示せたと考えている。今回の対象よりも長いトンネルではTS観測値を調整に組み込むことも一つの方法である。今後これらの点についてさらに調査するとともに一連の作業を自動化し、実用性を高めて行くつもりである。

## 参考文献

- 1) 桜井春輔, 足立紀尚: 都市トンネルにおける NATM, 鹿島出版会, pp.177-198, 1988.
- 2) 森忠治: 測量学 2 応用編, 丸善, pp.250-252, 1981.
- 3) 大嶋太市: 測量学 (基礎編), 共立出版, 1997.
- 4) 建設省土木研究所道路部トンネル研究室編: トンネル施工における自動化技術の開発に関する研究, 平成6年度共同研究報告書, 1995.3.
- 5) Zhang, C.: Rock Displacement Measurement by Precise Close Range Photogrammetric System, 京都大学大学院土木工学専攻博士論文, 2000.3.
- 6) Brown, D.C.: STARS (Simultaneous Triangulation and Resection System), A Turnkey System for Close-Range Photogrammetry, *International Archives of Photogrammetry*, vol.24, Com. V, No.1, pp.68-89, 1982.
- 7) Mikhail, E.M.: An Introduction to Non-Topographic Photogrammetry, in *Non-Topographic Photogrammetry*, ed. by ASPRS, pp.1-6, 1989.
- 8) Fraser, C.S.: 工業計測技術と写真測量, 写真測量とリモートセンシング, Vol.29, No.6, pp.52-61, 1990.
- 9) Atkinson, K.B.(ed.): *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles, 1996.
- 10) Fraser, C.S.: Microwave Antenna Measurement, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52-10, pp.1627-1635, 1996.
- 11) Fraser, C.S., Hattori, S., Okamoto, A. and Uno, N.: Development of a Vision-Based Dimensional Inspection System for Freeway Bridge Blocks, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ComV, 32-5, pp.47-52, 1998.
- 12) 秋本圭一, 服部進, 岡本厚, 井本治孝: CCDカメラを用いた大型構造物の3次元精密計測, 計測自動制御学会講演会 (千葉), 109 C-1, 1998.7.
- 13) 秋本圭一, 服部進, 井本治孝: デジタル画像計測法を用いた精密工業計測, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J84-D-II, No.7, pp.1299-1309, 2001.
- 14) American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ed.), *Manual of Photogrammetry (Fourth Edition)*, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1980.
- 15) Weng, J., Cohen, P. and Herniou, M.: Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14-10, pp.965-980, 1992.
- 16) 服部進, 秋本圭一, 岡本厚, 長谷川博幸, 井本治孝: ターゲット場の多重撮影による基準点のない CCD カメラキャリブレーション, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J82-D-II, No.9, pp.1391-1400, 1999.
- 17) Teunissen, P.: Zero Order Design, in E.W. Grafarend and F. Sanso ed., *Optimization and Design of Geodetic Networks*, pp.11-31, Springer, 1985.
- 18) Granshaw, S.I.: Bundle Adjustment Methods in Engineering Photogrammetry, *Photogrammetric Record*, 10-56, pp.181-207, 1980.
- 19) Koch, K.R.: *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models, 2nd edition*, Springer, 1997.
- 20) Akimoto, K., Fraser, C.S., Hasegawa, H. and Hattori, S.: Comparison of Free Network Solutions by the Artificial Basis-Based Method with One by the Generalized Inverse in Video Metrology, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXII-5, pp.17-22, 1998.
- 21) 服部進, 秋本圭一, 井本治孝: デジタル写真測量による工業計測の自動化について, 8 th SICE 中国支部学術講演会論文集, pp.78-79, 1999.

(2001.1.17 受付)

## APPLICATION OF VISION METROLOGY TO TUNNEL PROFILE MEASUREMENT

Keiichi AKIMOTO, Susumu HATTORI, Yuzo OHNISHI and Satoru MIURA

While vision metrology is in principle well-established technology, many ambiguous aspects exist, if it is applied to construction site measurement. This paper treats its further application to tunnel profile measurement to exemplify its usefulness and to make the problems clear. The technic with one CCD camera was applied to the three-dimensional deformation measurement of a tunnel of seven meters in diameter. 272 retro-reflective targets and nine scale bars placed on the wall and additionally on the floor of 15m in longitude were imaged by 66 exposures. The object coordinates of the targets are adjusted by the bundle method. The result was compared with 20 check points which were observed by a total station and adjusted by free network. The root means square of difference was 0.548mm.