

# 画像を利用したトンネル内空変位自動視準計測システムの開発

## Development of convergence measurement method of tunnel with image processing

竹内啓五<sup>1)</sup>・和田孝史<sup>2)</sup>・泉谷泰志<sup>3)</sup>・宮下国一郎<sup>4)</sup>・厨川弘樹<sup>5)</sup>

Keigo TAKEUCHI, Takashi WADA, Yashushi IZUMIYA, Kuniichirou MIYASHITA, Hiroki KURIYAGAWA

In this paper we propose a new method for convergence measurement of tunnel. We achieve this using Electro-optical distance meter and Image processing technology. Image processing make possible to calculate correct point of target in tunnel automatically. And we can get 3-D information of target positions easily by personal computer. In experiment we verified possibilities of this method, and usefulness of user-interface of this system.

**Key Words:** Image processing, convergence, Electro-optical distances meter, CCD-Camera

### 1. はじめに

トンネル工事において、トンネルの内空形状を計測管理することは、周辺地山の安定性を把握する上で非常に重要な日常管理項目である。トンネル内空の計測手段としては、コンバージェンスメジャーなどが用いられていたが、近年測距測角機能を備えた光波距離計(以下トータルステーション)の普及と共に、同装置の利用もさかんになりつつある。同装置は遠隔計測が可能のため大断面や大規模空洞での利用に適している。また他の作業を妨げることなく計測ができる点も有効といえる。しかしこれを用いた計測は人による計測であるため、個人差が出やすい、視準の位置あわせに手間がかかる等の問題点があった。

そこで今回、トータルステーションをベースにその視準画像を自動的に処理することにより、計測をより簡易にかつ高精度に行う方法を開発したので報告する。本システムは、トンネル断面の変形状態をトータルステーションの接眼部に取り付けたCCDカメラにより計測するシステムである。本システムは、ターゲットの視準画像を概略あわせるだけで、あとは画像処理と携帯型パソコンのプログラムにより、計測準備、計測、計測データの記録・収集までの一連の計測作業ができるという大きな特徴を有している。システムの構築・検証に当たっては、フィールド実験、現場実証実験を通して、計測作業が簡易にかつ高精度に行えることを確認することができた。

### 2. 開発のねらいと計測原理

本提案の最大の特徴は、トータルステーションの視準画像に対して画像処理を行うことにより、計測対象ターゲットの位置を自動的に取得する点にある。通常トータルステーションによりターゲットの視準を行う場合、

---

1) 清水建設(株) 技術研究所 エンジニアリング研究開発部

2) 同 土木本部 技術開発部

3) 同 土木本部 技術2部

4) 同 技術研究所 特別プロジェクト部

5) 同 土木東京支店

対象のターゲット中心を視準望遠鏡内の十字線の中央に合わせて、測距・測角を行うのが一般的である。この手順において最も苦勞するのは、ターゲットと十字線をあわせる作業である。ここにおける誤差が測定の個人差として表われやすい。この誤差は、ターゲットの中心と十字線の中心とのずれであり、一般に3秒程度のずれがあるといわれている。ターゲットが遠くになると、その像は小さくなり中心と十字線を合わせるのはさらに至難になる。そこで、開発のねらいとしてこの誤差の生じやすいターゲット視準作業を、概略視準あわせで、精度良くかつ効率的な計測作業ができないかという点に着目した。

この解決策として、トータルステーションの視準画像に対し画像処理を行うことにより、計測対象ターゲットの位置を自動的に取得する方法を検討した。

通常ターゲットとして用いられるものはプリズムや反射シートであるが、今回は反射シートを利用した。さらに画像処理を行いやすい画像を取得するために、トータルステーション位置からターゲットに対して小型ライトにて照明した。これにより背景とのコントラストの高いターゲットの画像を得られるようにした。視準画像を得るための装置としては小型のCCDカメラを接眼部に装着している。この際カメラの光軸とトータルステーションの光軸を一致させている。

カメラを通して入力した画像に対し、以下の手順で画像処理を行う。今回の処理はまず、閾値判別法による自動二値化を行う<sup>1)</sup>。次にターゲットと思われる画像内の対象の重心位置計測を行い、最終的には画像の中心、つまりトータルステーションの光軸とのずれを算出する。このずれは、トータルステーションが測距・測角を行った値との誤差を表わすものである。このずれを補正することにより正確なターゲット位置を計算できる。

図-1, 2はずれの補正に関する概念図である。

各パラメータは以下になる。

- $L$  トータルステーション出力の斜距離
- $\alpha$  トータルステーション出力の水平角度
- $\beta$  トータルステーション出力の鉛直角度
- $\alpha t$  実際の水平角度
- $\beta t$  実際の鉛直角度
- $Xt, Yt$  画像内ターゲット中心座標
- $Xco, Yco$  トータルステーション視準中心
- $Dx, Dy$  画像内視準誤差

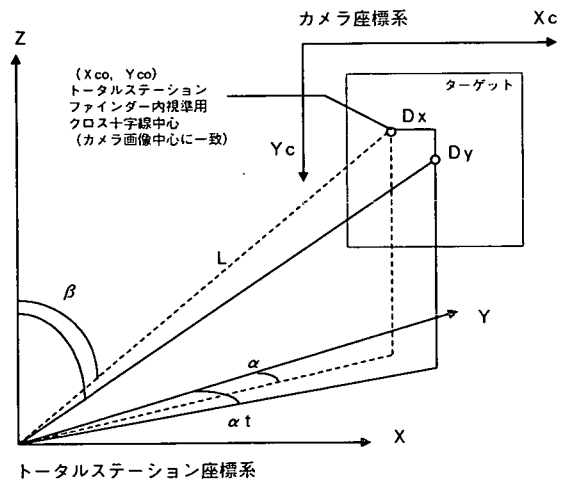


図-1 測定座標系

画像座標内において視準誤差は以下のように表される。

$$Dx = Xt - Xco$$

$$Dy = Yt - Yco$$

この誤差をトータルステーションの座標系の単位にあわせた後、角度として表現する。

$$Dx' = k \cdot Dx$$

$$Dy' = k \cdot Dy \quad (k \text{ は単位変換係数})$$

距離  $L$  に対し  $Dx'$ 、 $Dy'$  は非常に小さいと仮定できる

ので角度表現は以下ようになる。

$$Dx'' = \tan^{-1} (Dx' / L)$$

$$Dy'' = \tan^{-1} (Dy' / L)$$

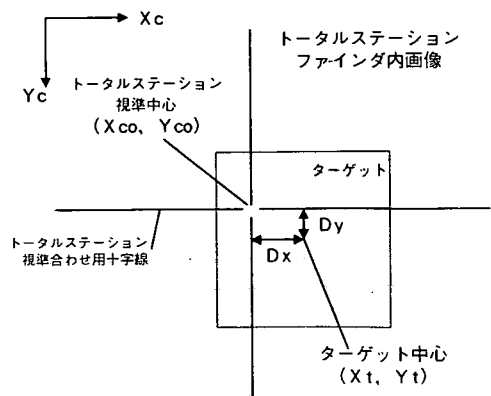


図-2 視準画像

視準誤差を角度として表現した値をトータルステーションの出力値に加算する。これにより視準誤差を考慮したターゲットの中心座標を求める。

$$\alpha_t = \alpha + D_x''$$

$$\beta_t = \beta + D_y''$$

このように画像情報を元に補正することにより、正確なターゲット位置を計算することが可能になる。この事は、視準の際に正確に十字線とターゲットを合わせる必要が無いことも示している。つまりこれにより計測作業の大幅な簡略化が計れることになる。

### 3. 実験装置

トータルステーションはトプコン社製GTS-700、カメラは東芝KM-401、画像処理装置はシャープ社製のGSIP、ライトはマグライトを利用した(図-3参照)。データ収集および画像処理装置の制御用にペン入力パソコン三菱AMITYを利用した。

視準画像は一旦画像処理装置に入力され、処理画像は小型液晶モニタ(6インチ)に表示される。画像処理装置の制御および処理結果の集積はパソコンにて行われる。ターゲットは、反射シートを5x5cm正方形に切断したものをトンネル側面に直接あるいはアングルなどの治具を利用して取り付けた。この際注意する点は、トータルステーションの設置位置に対してできるだけ正対するように取り付ける点である。反射シートの性能はある程度の角度までは光を十分に反射するということから、その角度を超えないように注意する必要があった(図-4参照)。

また、ずれの補正量は、ターゲットまでの距離に応じて変化させる必要がある。ターゲットが遠くなればその距離に応じて画面上に映るターゲットの像は小さくなるのであらかじめ距離と画像上の像の大きさの関係を求めておく必要がある(グラフ-1)。

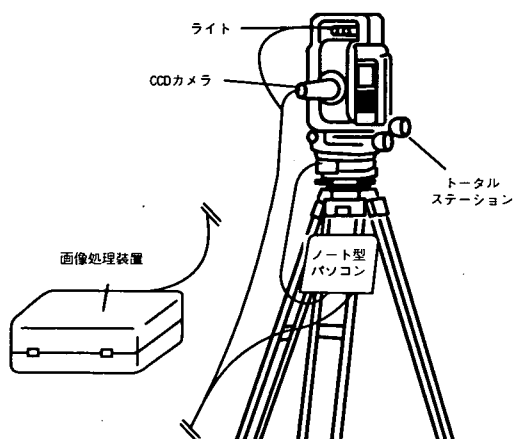


図-3 装置概要

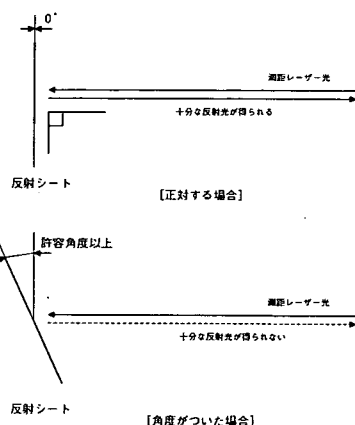


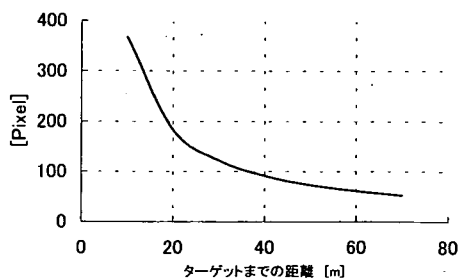
図-4 反射シート

### 4. 実験

実験は当社技術研究所内での計測実験と、実際のトンネル現場での実証実験の大きく2段階に分けて行った。技術研究所における実験は4-1から4-3についてである。

#### 4-1 計測精度の検証

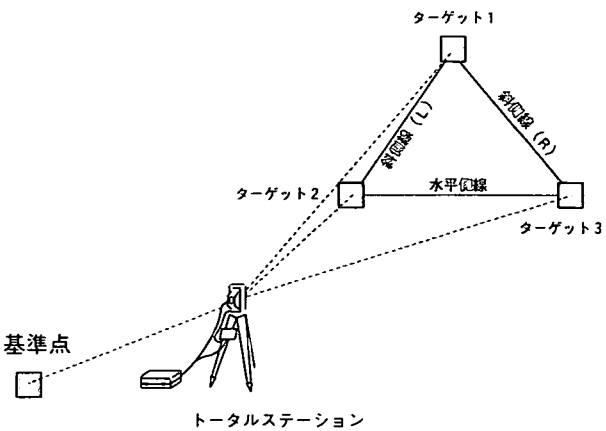
反射シートターゲットをコンクリート造の建物の壁面に3箇所設置し、その位置を計測した。場所を変えた位置から数回計測し、高さ方向の精度と3箇所のターゲット



グラフ-1 距離とターゲット撮像範囲  
[5cmターゲットの撮像範囲]

間の距離精度を確認した。ここにおける3箇所のターゲット位置はトンネルの内空変位計測における、天頂部、左右壁面部を想定して取り付けている。またこれ以降における計測は、基準点計測も含め、すべて画像処理機能を利用した計測を行っている。

計測手順としては、まず基準点となるターゲットを視準計測し、トータルステーションの機械位置（高さのみ）を計算した後、壁面に設置したターゲットの計測を行った。計測は数回繰り返すが、ターゲットは不動と仮定できるので理想的には、同じ値を示すはずである。計測結果を表－1、2に示す。水平測線はターゲット2－3間の



図－5 実験概要

の距離、天端沈下はターゲット1の基準点に対する高さ、斜測線（L）（R）はそれぞれターゲット1－2、1－3間の距離を表す。変位量は最初の計測に対する各計測値のずれを表している。計測は2回、それぞれ別の組み合わせのターゲットに対し行った。結果として変位量を評価するが、概ね2mmの振れ幅にとどまっており計測精度としては±1mm、トータルステーションとターゲットの間の距離を考慮すると±2秒程度に納まっている。今回利用しているトータルステーションは測角の機械精度が1秒であり、画像処理による誤差は1秒程度になると考えられる。従来人による視準計測の場合、計測精度は3秒程度といわれているので、同システムは十分な高精度を達成していると考えられる。

表－1 精度確認実験（1）

| 日付        | 時間       | トータルステーションからの距離 [m] |       | 計測値 [m] |        |        |        | 変位量 [m] |         |         |         |
|-----------|----------|---------------------|-------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
|           |          | 基準点                 | ターゲット | 水平測線    | 天端位置   | 斜測線(L) | 斜測線(R) | 水平測線    | 天端沈下    | 斜測線(L)  | 斜測線(R)  |
| 1998/9/22 | 17:03:00 | 12                  | 45    | 1.1958  | 1.7756 | 1.3285 | 1.1954 | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  |
| 1998/9/22 | 17:03:00 | 12                  | 45    | 1.1959  | 1.7757 | 1.3285 | 1.1956 | -0.0001 | -0.0001 | -0.0001 | -0.0002 |
| 1998/9/22 | 17:45:00 | 12                  | 45    | 1.1959  | 1.7756 | 1.3281 | 1.1951 | -0.0001 | 0.0000  | 0.0003  | 0.0004  |
| 1998/9/22 | 17:45:00 | 12                  | 45    | 1.1957  | 1.7759 | 1.3284 | 1.1950 | 0.0001  | -0.0003 | 0.0001  | 0.0004  |
| 1998/9/22 | 18:15:00 | 20                  | 35    | 1.1959  | 1.7747 | 1.3284 | 1.1950 | -0.0001 | 0.0009  | 0.0000  | 0.0005  |
| 1998/9/22 | 18:15:00 | 20                  | 35    | 1.1959  | 1.7748 | 1.3284 | 1.1952 | -0.0002 | 0.0008  | 0.0001  | 0.0002  |

表－2 精度確認実験（2）

| 日付        | 時間       | トータルステーションからの距離 [m] |       | 計測値 [m] |        |        |        | 変位量 [m] |         |         |         |
|-----------|----------|---------------------|-------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
|           |          | 基準点                 | ターゲット | 水平測線    | 天端位置   | 斜測線(L) | 斜測線(R) | 水平測線    | 天端沈下    | 斜測線(L)  | 斜測線(R)  |
| 1998/9/23 | 14:40:00 | 45                  | 82    | 4.2912  | 3.7727 | 3.6296 | 2.6641 | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  |
| 1998/9/23 | 14:40:00 | 45                  | 82    | 4.2912  | 3.7733 | 3.6291 | 2.6650 | 0.0000  | -0.0006 | 0.0005  | -0.0009 |
| 1998/9/23 | 15:06:00 | 60                  | 67    | 4.2919  | 3.7723 | 3.6298 | 2.6655 | -0.0006 | 0.0004  | -0.0002 | -0.0014 |
| 1998/9/23 | 15:06:00 | 60                  | 67    | 4.2917  | 3.7720 | 3.6296 | 2.6651 | -0.0005 | 0.0007  | 0.0000  | -0.0010 |

4－2 ターゲット反射角度実験

この実験は、画像処理機能の検証とは本質的に異なるが、ターゲット設置条件を考慮する場合の限界を確認するために行った。

実験では、設置したターゲットをトータルステーションの光軸に対して傾けて行き、計測が不可能になる角度まで傾けていった。結果を表－3に示す。今回利用した反射シートの場合35°まで計測が可能であった。これは現場等において多少ラフな取り付け方でも測定が可能であることを示している。

#### 4-3 ターゲットサイズ確認実験

これは反射シートターゲットを、今まで用いていた5cm角より小さなサイズにし、どこまで計測が可能かを検証した。計測に際しては、実験4-2同様に角度もつけることにした。先の実験を踏まえ、35°まで確認した。結果を表-4に示す。4cm角まではすべて計測を行うことができ、3cm角でも角度を25°以内に取付ければ計測できることがわかった。

以上の実験を通し同システムの精度と、ターゲット設置条件の限界を探った。

#### 4-4 現場における実証実験

現場における実証実験は、実際に掘削を行っているトンネル現場にて行った。手順は技研における計測精度検証実験と同様の方法にて行った。位置のわかっている基準点を視準の後、測定対象断面の天頂部、側壁面部に取り付けたターゲットを測定した。ターゲットは5cm角を

用いた。取り付けに際しては、極力トータルステーションの光軸に対し正対するよう注意した。計測断面とトータルステーションの位置も計測に少なからず影響する点を踏まえ、結果は斜距離がほぼ同一の結果毎にまとめている。結果の評価は実験4-1同様天端沈下と各測線の長さを比較することで行った。結果を表-5に示す。これは掘削後変動が止まったことが確認できた断面の結果である。誤差は大きなもので±1.8mmであったが、その他

表-3 反射角度実験

|     | トータルステーション ターゲット間距離 |         |         |         |         |        |
|-----|---------------------|---------|---------|---------|---------|--------|
|     | 15m                 |         |         | 87m     |         |        |
|     | X                   | Y       | Z       | X       | Y       | Z      |
| 20度 | 15.0157             | -0.3514 | -0.1899 | 86.9190 | 0.0002  | 0.0185 |
|     | 15.0154             | -0.3515 | -0.1899 | 86.9190 | 0.0005  | 0.0183 |
|     | 15.0150             | -0.3515 | -0.1899 | 86.9193 | 0.0008  | 0.0186 |
|     | 0.0007              | 0.0001  | 0.0000  | 0.0003  | 0.0006  | 0.0003 |
| 25度 | 15.0116             | -0.3564 | -0.1898 | 86.9200 | -0.0010 | 0.0180 |
|     | 15.0126             | -0.3564 | -0.1898 | 86.9200 | -0.0012 | 0.0181 |
|     | 15.0126             | -0.3564 | -0.1899 | 86.9197 | -0.0017 | 0.0184 |
|     | 0.0010              | 0.0000  | 0.0001  | 0.0003  | 0.0007  | 0.0004 |
| 30度 | 15.0125             | -0.3576 | -0.1899 | 86.9210 | -0.0032 | 0.0186 |
|     | 15.0125             | -0.3576 | -0.1899 | 86.9213 | -0.0034 | 0.0185 |
|     | 15.0125             | -0.3577 | -0.1900 | 86.9217 | -0.0028 | 0.0190 |
|     | 0.0000              | 0.0001  | 0.0001  | 0.0007  | 0.0006  | 0.0005 |
| 35度 | 15.0427             | -0.3497 | -0.1897 | 86.9227 | -0.0051 | 0.0206 |
|     | 15.0427             | -0.3498 | -0.1898 | 86.9223 | -0.0043 | 0.0203 |
|     | 15.0424             | -0.3497 | -0.1898 | 86.9227 | -0.0046 | 0.0208 |
|     | 0.0003              | 0.0001  | 0.0001  | 0.0004  | 0.0008  | 0.0005 |
| 40度 | 計測不能                |         |         | 86.9250 | -0.0053 | 0.0213 |
|     |                     |         |         | 86.9253 | -0.0058 | 0.0213 |
|     |                     |         |         | 86.9240 | -0.0063 | 0.0211 |
|     |                     |         |         | 0.0013  | 0.0010  | 0.0002 |

網掛けは、最大誤差。

表-4 ターゲットサイズ実験

| ターゲットサイズ | 角度<br>距離 | 0° | 20° | 25° | 30° | 35° |
|----------|----------|----|-----|-----|-----|-----|
| 5 cm角    | 80m      | ○  | ○   | ○   | ○   | ○   |
|          | 50m      | ○  | ○   | ○   | ○   | ○   |
|          | 40m      | ○  | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 4 cm角    | 80m      | ○  | ○   | ○   | ○   | ○   |
|          | 50m      | ○  | ○   | ○   | ○   | ○   |
|          | 40m      | ○  | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 3 cm角    | 80m      | ○  | ○   | ○   | ×   | ×   |
|          | 50m      | ○  | ○   | ○   | ○   | ○   |
|          | 40m      | ○  | ○   | ○   | ○   | ○   |

○は計測可能。×は計測不能（三次元位置を計測できない）。  
角度は、トータルステーションとターゲットを結ぶ線に垂直な面に対する角度。距離は、光波測距儀とターゲットの距離

表-5 変位確認実験（トンネル現場）

| 日付         | 時間       | トータルステーション<br>からの距離 [m] | 計測値 [m] |          |        |        | 変位量 [m] |         |         |         |
|------------|----------|-------------------------|---------|----------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
|            |          |                         | 水平測線    | 天端位置     | 斜測線(L) | 斜測線(R) | 水平測線    | 天端沈下    | 斜測線(L)  | 斜測線(R)  |
| 1998/12/22 | 17:03:00 | 74.3                    | 9.3092  | 785.3964 | 6.2270 | 7.0654 | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  |
| 1998/12/22 | 17:12:00 | 75.0                    | 9.3081  | 785.3950 | 6.2261 | 7.0636 | 0.0011  | 0.0014  | 0.0009  | 0.0018  |
| 1998/12/22 | 16:56:00 | 75.0                    | 9.3087  | 785.3943 | 6.2273 | 7.0644 | 0.0005  | 0.0021  | -0.0003 | 0.0011  |
| 1998/12/22 | 17:20:00 | 75.2                    | 9.3074  | 785.3954 | 6.2263 | 7.0644 | 0.0018  | 0.0010  | 0.0007  | 0.0010  |
| 1998/11/9  | 15:28:00 | 75.8                    | 9.3090  | 785.3958 | 6.2252 | 7.0664 | 0.0002  | 0.0006  | 0.0017  | -0.0010 |
| 1998/11/9  | 15:43:00 | 75.9                    | 9.3093  | 785.3968 | 6.2267 | 7.0639 | -0.0001 | -0.0004 | 0.0003  | 0.0015  |
| 1998/11/9  | 15:43:00 | 75.9                    | 9.3093  | 785.3967 | 6.2266 | 7.0629 | -0.0002 | -0.0003 | 0.0004  | 0.0026  |
|            |          |                         | 平均値     |          |        |        | 0.0005  | 0.0006  | 0.0005  | 0.0010  |
|            |          |                         | 最大値     |          |        |        | 0.0018  | 0.0021  | 0.0017  | 0.0026  |
|            |          |                         | 最小値     |          |        |        | -0.0002 | -0.0004 | -0.0003 | -0.0010 |
|            |          |                         | 誤差の幅    |          |        |        | ±0.0010 | ±0.0012 | ±0.0010 | ±0.0018 |

については $\pm 1\text{mm}$ 程度と通常の計測においては支障の無い範囲であった。また、この誤差については計測を行う際の視準地点がばらついていたこと、坑内の環境条件に差があったこと等による誤差が含まれており、これらに留意することにより上記誤差はさらに低減するものと考えている<sup>2)</sup>。

#### 4-5 ユーザーインターフェースの確認

現場における実証実験のもう一つの項目として、今回開発した装置の操作性について確認を行った(図-6参照)。これは実際に操作を行った担当者に対するヒアリングを通して行った。指摘された点は以下の項目にまとめられる。

- 1) 機材のコンパクト化
- 2) 操作ソフトの簡略化

第1点は、実際の測量作業の際には、より携帯性を高める必要性を指摘するものである。作業現場自体が錯綜した環境であるため計器類は極力小型化する必要がある。第2点は、測定と同時により多くの情報を提供できるようにすること、現地での入力作業をより減らすようにすること等を意味している。これらの指摘は今後の開発を進める上での検討課題とした。

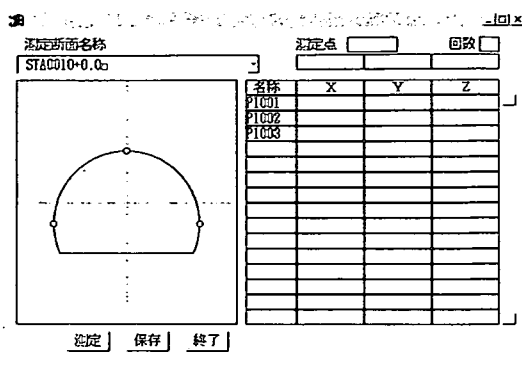


図-6 操作インターフェース画面

#### 5. 結論および考察

トータルステーションの視準画像を自動処理することにより、簡便にトンネルの内空変位を計測する装置を開発した。人の目による視準合わせが必要なく、かつ測定の個人差も無くす事ができる。トンネル壁面に取り付けた反射シートの三次元座標を、簡単な手順でパソコンに集積できる。測定誤差は、研究室レベルで $\pm 2$ 秒(100mで約1mm)、現場実測においても $\pm 4$ 秒未満であった。

今後の課題として、誤差の幅の縮小、装置の小型化、操作インターフェースの改良、測定距離の延長等が上げられた。装置の小型化においては、画像処理装置やカメラとその電源等を含めたシステム全体を見直す必要がある。操作インターフェースに関しては、ペンパソコンを利用している関係上、できるだけ文字入力を少なくしようとするものである。測定距離の延長は、1度に計測できる断面数を増やしたいことによる。これらの課題は現在の技術で十分対応可能であるので、順次改良を進めていく事としている。

#### 6. おわりに

画像処理技術を利用した自動視準システムの開発を行い、実証実験等を通し、その性能を確認した。同システムは、トータルステーションをベースにその視準画像を自動処理し、三次元位置を計測するものである。基本的な性能として、計測作業の簡略化、測量データの自動収集、計測精度の安定が確認された。

#### 謝辞

この開発にあたり多大な協力を頂いた関係者の方々に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 高木幹雄、下田陽久：“画像解析ハンドブック”、東京大学出版、p503、1991
- 2) 宮下国一郎、征矢雅宏、新宅正道：“光波測距儀を用いた内空変位計測の誤差に関する検討”、清水建設社内報告書、1991.4