

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

竹内 啓五 和田 孝史 泉谷 泰志 宮下 国一郎 厨川 弘樹
(技術研究所) (土木本部) (土木本部) (技術研究所) (土木東京支店)

Development of Convergence Measurement Method of Tunnel with Image Processing

by Keigo Takeuchi, Takashi Wada, Yashushi Izumiya, Kuniichirou Miyashita and Hiroki Kuriyagawa

Abstract

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.

概 要

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である。近年、同計測の手段として遠隔計測が可能なトータルステーションの利用が盛んになりつつある。しかし、ターゲット視準作業は熟練を要する作業であり、測定において個人差が出やすいという問題があった。そこで、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することで、計測をより簡易にかつ高精度に行うシステムを検討・開発した。同方法は計測に個人差を無くす事ができるだけでなく、将来の自動計測も実現可能にするものである。

§ 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、同装置の利用も盛んになりつつある¹⁾。同装置は遠隔計測が可能なため大断面や大規模空洞での利用に適し、他の作業を妨げることなく計測ができる。しかし、目視による計測は人による計測であるため、個人差が出やすい、そして視準の位置あわせに手間がかかる等の問題点があった。

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システムを開発した。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ものである。基本的な操作は、ターゲットの視準画像を概略あわせるだけで、携帯型パソコンと画像処理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自動的にできる。システムの構築・検証に当

たっては、予備実験、及び現場での実証実験を行い、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

本システムの最大の特徴は、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、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秒程度のずれは避けられないといわれている。ターゲットが遠くになるとその像は小さくなり、その中心と十字線を合わせるのはさらに至難になる。この誤差の生じやすいターゲット視準作業を、概略視準合わせで、精度良くかつ効率的な計測作業を実現することが本開発のねらいである²⁾。

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、本システムでは反射シートを使用し、更に画像処理を容易に実現できる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を行った。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ことになる。視準画像を得るための装置に小型のCCDカメラを接眼部に装着し、カメラの光軸とトータルステーションの光軸は一致させる。

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³⁾。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^{4) 5)}。

各パラメータは以下ようになる。

- L トータルステーション出力の斜距離
- α トータルステーション出力の水平角度
- β トータルステーション出力の鉛直角度
- αt 実際の水平角度
- βt 実際の鉛直角度

X_t, Y_t 画像内ターゲット中心座標

X_{co}, Y_{co} トータルステーション視準中心

D_x, D_y 画像内視準誤差

画像座標内において視準誤差は以下のように表される。

$$D_x = X_t - X_{co} \quad (1)$$

$$D_y = Y_t - Y_{co} \quad (2)$$

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。

$$D_x' = k \cdot D_x \quad (3)$$

$$D_y' = k \cdot D_y \quad (k \text{ は単位変換係数}) \quad (4)$$

距離Lに対し D_x' 、 D_y' 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。

$$D_x'' = \tan^{-1}(D_x' / L) \quad (5)$$

$$D_y'' = \tan^{-1}(D_y' / L) \quad (6)$$

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。

$$\alpha t = \alpha + D_x'' \quad (8)$$

$$\beta t = \beta + D_y'' \quad (9)$$

このように、得られた画像情報を元に補正を行うことで、正確なターゲット位置を計算することが可能になる。これにより、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なくなり、計測作業の大幅な簡略化が計れることになる。

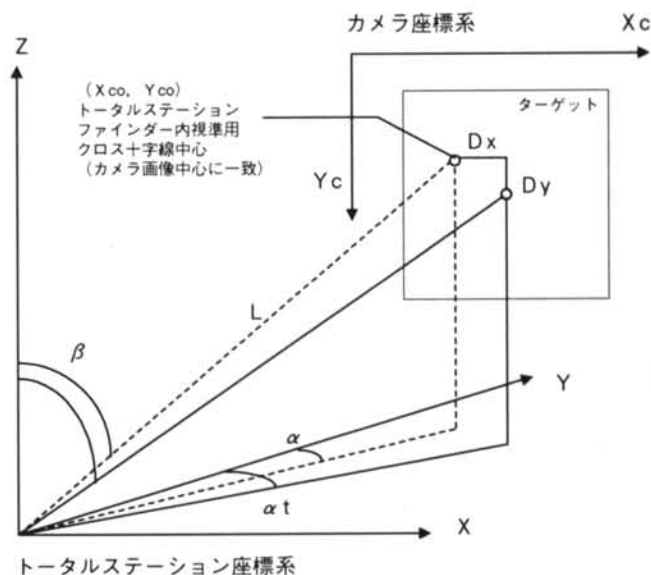


図-1 測定座標系

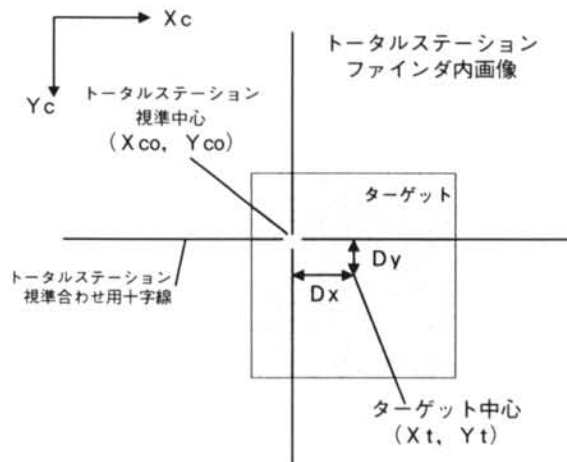


図-2 視準画像

§ 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使用した(図-3)。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を使用した。

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正方形に加工したものをトンネル側面に直接あるいは簡単な治具を利用して取り付けた。この際に注意する点は、トータルステーションの設置位置に対しできるだけ正対するように取り付けることである。反射シートは、ある程度の角度までは光を十分に反射するが、その角度を超えないように注意する必要がある。

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、予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(図-4)。

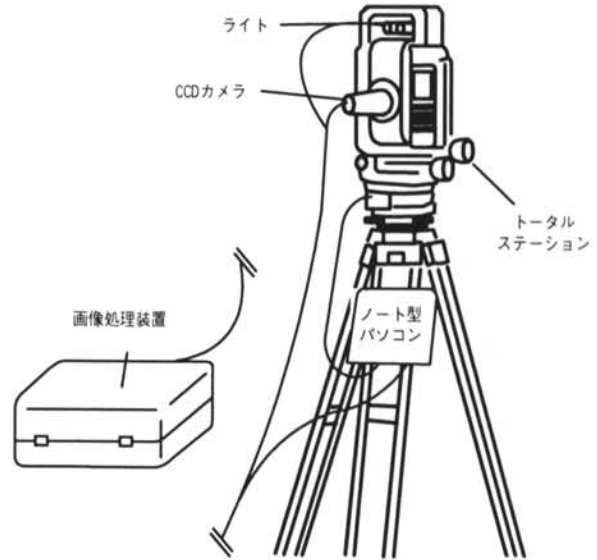


図-3 装置概要

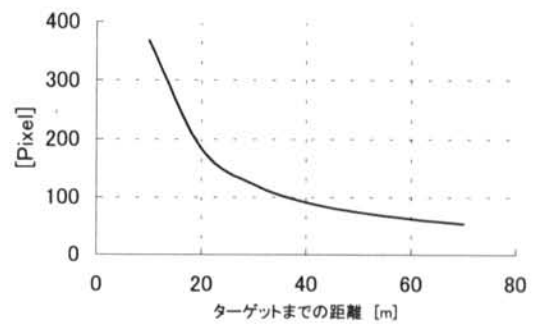


図-4 距離とターゲット撮像範囲
[5cm ターゲットの撮像範囲]

§ 4. 実験

実験は、当社技術研究所内での予備実験と、実際のトンネル現場での実証実験の2段階に分けて行った。技術研究所における実験結果を4.1から4.3に示す。

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。異なる位置から数回計測し、高さ方向の精度と3箇所のターゲット間の距離精度を確認した(図-5)。この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。

計測手順は、基準点となるターゲット座標を計測原理の項で説明した方法で計測し、トータルステーションの機械位置(鉛直方向)を計算した後、壁面に設置したターゲットの座標計測を同様の手順で行った。ターゲットは不動と仮定できるので、計測を数回繰り返し、計測結果の誤差を評価した。

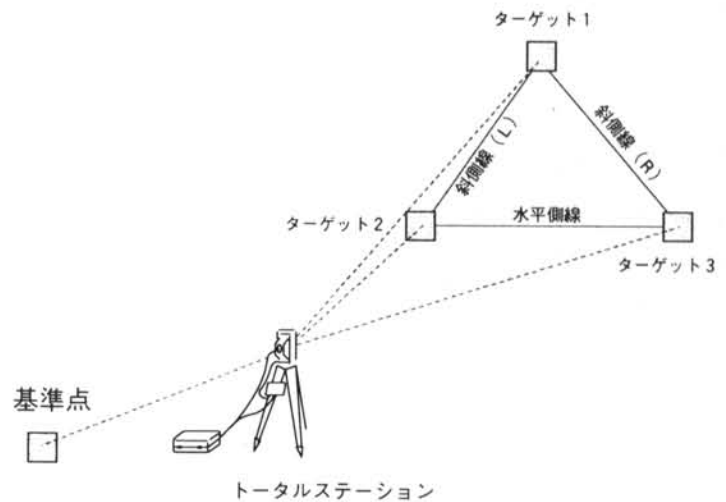


図-5 精度検証実験概要

		トータルステーションからの距離 [m]		計測値 [m]				変位量 [m]			
日付	時間	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	12	45	1.1958	1.7756	1.3285	1.1954	0	0	0	0
1998/9/22	17:03	12	45	1.1959	1.7757	1.3285	1.1956	-0.0002	-0.0001	-0.0001	-0.0002
1998/9/22	17:45	12	45	1.1959	1.7756	1.3281	1.1951	-0.0001	0	0.0003	0.0004
1998/9/22	17:45	12	45	1.1957	1.7759	1.3284	1.1950	0.0001	-0.0003	0.0001	0.0004
1998/9/22	18:15	22	35	1.1959	1.7747	1.3284	1.1950	-0.0001	0.0009	0	0.0005
1998/9/22	18:15	22	35	1.1959	1.7748	1.3284	1.1952	-0.0002	0.0008	0.0001	0.0002

		トータルステーションからの距離 [m]		計測値 [m]				変位量 [m]			
日付	時間	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	45	82	4.2912	3.7727	3.6296	2.6641	0	0	0	0
1998/9/23	14:40	45	82	4.2912	3.7733	3.6291	2.6650	0	-0.0006	0.0005	-0.0009
1998/9/23	15:06	60	67	4.2919	3.7723	3.6298	2.6655	-0.0006	0.0004	-0.0002	-0.0014
1998/9/23	15:06	60	67	4.2917	3.7720	3.6296	2.6651	-0.0005	0.0007	0	-0.0010

表一 精度検証実験(技術研究所)

上段：基準点-ターゲット間距離 57m 下段：127m

結果を表一に示す。水平測線は、ターゲット2-3間の距離、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、それぞれ別の組み合わせのターゲットに対し2回行った。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。今回使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。

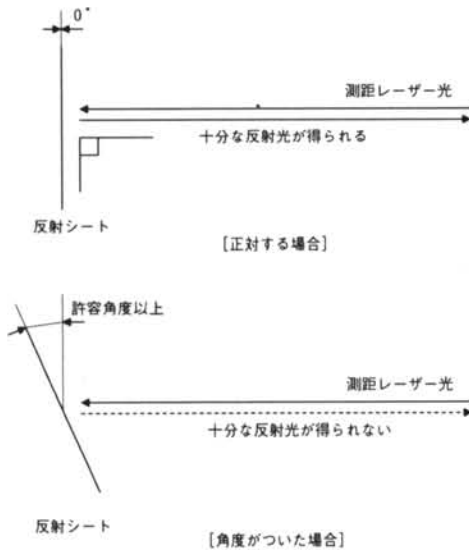


図-6 反射シート

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(図-6参照)。

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行った。結果を表二に示す。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、現場において、取り付けの際に多少傾きがあったとしても測定が可能であることを示している。

	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
	計測不能			86.9253	-0.0058	0.0213
	計測不能			86.9240	-0.0063	0.0211
	計測不能			0.0013	0.0010	0.0002

ゴシック表記は、最大誤差。

表二 反射角度実験

4.3 ターゲットサイズ確認実験

反射シートターゲットを、今まで用いてきた5×5cm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。結果を表一3に示す。4×4cmまではすべて計測を行うことができ、3×3cmでも角度を25°以内に取り付けられれば計測できることがわかった。

以上の実験を通し、本システムの精度とターゲット設置条件の限界を探った。

ターゲットサイズ	角度距離	角度				
		0°	20°	25°	30°	35°
5×5cm	80m	○	○	○	○	○
	50m	○	○	○	○	○
	40m	○	○	○	○	○
4×4cm	80m	○	○	○	○	○
	50m	○	○	○	○	○
	40m	○	○	○	○	○
3×3cm	80m	○	○	○	×	×
	50m	○	○	○	○	○
	40m	○	○	○	○	○

○は計測可能。 ×は計測不能。
角度は、トータルステーション光軸に垂直な面に対する角度。

表一3 ターゲットサイズ確認実験

4.4 現場における実証実験

掘削施工中のトンネル現場にて実証実験を行った。実験手順は、前述の計測精度検証実験と同様の方法にて行った。すでに既知であ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5×5cm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同様に天端沈下と各測線の長さを比較することで行った。結果を表一4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、その他については±1mm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、トータルステーションを設置した地面の固さ等坑内の環境条件に差があったことが原因と考えられる。これらの点に留意することにより上記の誤差は更に低減するものと考えられる⁶⁾。

日付	時間	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)	
1998/12/22	17:03	74.3	9.3092	785.3964	6.2270	7.0654	0	0	0	0	
1998/12/22	17:12	75.0	9.3081	785.3950	6.2261	7.0636	0.0011	0.0014	0.0009	0.0018	
1998/12/22	16:56	75.0	9.3087	785.3943	6.2273	7.0644	0.0005	0.0021	-0.0003	0.0011	
1998/12/22	17:20	75.2	9.3074	785.3954	6.2263	7.0644	0.0018	0.0010	0.0007	0.0010	
1998/11/09	15:28	75.8	9.3090	785.3958	6.2252	7.0664	0.0002	0.0006	0.0017	-0.0010	
1998/11/09	15:43	75.9	9.3093	785.3968	6.2267	7.0639	-0.0001	-0.0004	0.0003	0.0015	
1998/11/09	15:43	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

日付	時間	距離[m]	計測値 [m]				変位量 [m]				
			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)
1998/11/09	15:03	45.5	9.3092	785.3882	6.2256	7.0636	0	0	0	0	
1998/12/21	18:37	45.9	9.3080	785.3907	6.2258	7.0635	0.0012	-0.0025	-0.0002	0.0001	
1998/12/21	18:45	45.9	9.3084	785.3910	6.2266	7.0637	0.0008	-0.0028	-0.0010	-0.0002	
1998/11/09	15:14	46.2	9.3080	785.3901	6.2256	7.0634	0.0012	-0.0019	0.0000	0.0002	
1998/12/21	18:21	46.6	9.3072	785.3895	6.2257	7.0621	0.0021	-0.0013	-0.0001	0.0014	
1998/12/21	18:30	46.6	9.3091	785.3898	6.2256	7.0647	0.0001	-0.0016	-0.0001	-0.0011	
1998/11/12		47.2	9.3084	785.3899	6.2256	7.0641	0.0009	-0.0017	-0.0001	-0.0005	
							平均値	0.0009	-0.0017	-0.0002	0.0000
							最大値	0.0021	0.0000	0.0000	0.0014
							最小値	0.0000	-0.0028	-0.0010	-0.0011
							誤差の幅	±0.0010	±0.0014	±0.0005	±0.0013

表一4 精度検証実験(トンネル掘削作業現場)

上段：ターゲット距離約75m 下段：約46m

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-7参照)。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。指摘された内容は、次の2点にまとめられる。

- 1) 機材のコンパクト化
- 2) 操作ソフトの簡略化

第1点は、現地での測量作業の際の携帯性である。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ことを示している。

第2点は、測定と同時に情報提供として各側線長や前回計測値との比較を容易に確認できること、ルーチン化した計測手順をまとめ、極力キー入力操作を軽減すること等を示している。具体的には、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。

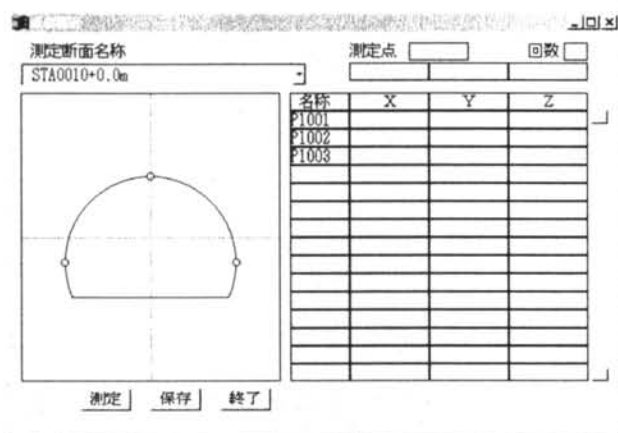


図-7 ユーザーインターフェース

§ 5. 結論

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。人的誤差のある視準合わせ操作の必要が無くなり、測定の個人差を無くす事ができる。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±2秒(100mで約1mm)、現場実測においても±4秒未満であった。

§ 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。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、計測精度が確認された。

今後の課題として、誤差のばらつきの縮小、装置の小型化、操作インターフェースの改良、測定距離の延長を見直す必要がある。操作インターフェースに関しては、できるだけ操作手順を少なくする必要がある。測定距離の延長により、1度に計測できる断面数を増やし、更に作業効率の向上を目指す。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にしたい。

謝辞

この開発にあたり多大な協力を頂いた現場関係者の方々に感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 鎌田深己, 福田博之, 鍛冶茂仁, 高橋祐治: "山岳トンネル用計測管理システム", 第2回建設ロボットシンポジウム論文集, pp205-212, 1991
- 2) 山本和彦, 横矢直和, 坂上勝彦: "目視検査の自動化事例集", 新技術コミュニケーションズ, 1991
- 3) 高木幹雄, 下田陽久: "画像解析ハンドブック", 東京大学出版, 1991
- 4) 金谷健一: "画像理解", 北森出版, 1990
- 5) 鈴木茂夫: "CCDと応用技術", 工学図書, 1997
- 6) 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