

# トンネル内空変位自動計測システムの開発

竹内 啓五 泉谷 泰志 宮下 国一郎 藤井 攻  
(技術研究所) (土木事業本部) (技術研究所) (土木事業本部)

## Development of Automatic Convergence Measurement Method in Tunnel Construction

by Keigo Takeuchi, Yashushi Izumiya, Kuniichirou Miyashita and Osamu Fujii

### Abstract

In this paper we propose a improved equipment for convergence measurement of tunnel construction. We proposed the equipment which using an Electro-optical distance meter and Image processing technology before. Image processing made possible to calculate correct point of target in tunnel automatically. And we could get 3-D information of target positions easily by personal computer. But some themes were shown. Therefore, we use the Electro-optical distance meter with a servomechanism this time and improve in the ability of the automatic measurement. This equipment can adjust the direction to the position of the target automatically. Moreover, we improved the program of the image processing for high-speed and correctness. In experiment we verified possibilities of this equipment, and usefulness of user-interface of this system.

### 概要

トンネル工事において、トンネル内空形状の計測管理は、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、同計測にトータルステーションの利用が盛んになりつつある。我々はこの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、効率的に計測を行うシステムを開発してきた。今回はこの自動計測機能を更に強化するため、サーボ機構つきのトータルステーションをベースとすることで、計測点をすべて自動的に計測するシステムを構築した。装置の検証は研究所における精度検証と現場での実測を通して行い、同装置の有効性を確認した。

### § 1. はじめに

トンネル工事において、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TS: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<sup>1)</sup>。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、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。

上記視点から、我々はTSをベースに計測を、より簡易にかつ高精度に行うシステムの開発を行ってきた<sup>2)</sup>。今回は現場での運用を通して明らかになった課題を元に、新たにサーボ機構を搭載したTS

をベースとすることで、さらに自動計測機能を向上させた装置の開発を行った。本システムは、計測ターゲットをTS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。システムの検証として、精度検証実験、および現場での実測を行い、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. 装置の改良

先に開発したシステムは、ベースとなるTSとしてトプコン社製GTS700を利用した。このTSの接眼部分にカメラを取り付け、視準画像を画像処

理することで自動的に、かつ精度良く計測を行うことができた<sup>2)</sup>。しかし、同TSはサーボ機構を持たないため、計測するターゲットに対して毎回向きを手動で合わせる必要があった。また、カメラにより視準レンズが塞がれるため、直接目で視準の状況を観測することができなかった。

これらの点を克服し、さらに効率的な計測を実現するために、次に示す改良を行った。

### 2.1 方向合わせ機能

これは一度計測した点に対して、次に計測する際に、その方向へ自動的にTSの向きを合わせる機能である。これはサーボ搭載のTSにより実現できる機能である。今回のシステムではトプコン社製GTS800(図-1)を利用した。

通常の見視による視準では、おおよその方向合わせから、さらに視準レンズを覗きながらターゲット中心をあわせこむ必要がある。しかし、本システムは、視準視野内にターゲット像が写ることで自動計測が可能のため、おおよそ方向が合致しているだけで正確な計測が可能である。そのため短時間に計測を実現することができる。今回の装置は、さらに対象までの距離を測定した後、同距離情報を元にフォーカスを合わせる機構を搭載している。そのため方向合わせから、画像計測までの一連の動作すべてが自動的に行うことができる。



図-1 サーボ搭載トータルステーション

### 2.2 画像分配機能

先に開発した装置は、視準レンズ部分にカメラを取り付けた関係上、直接目視でターゲット像を確認できなかった。この点は、現場での計測のみならず簡易な調整などにおいても、非常に支障をきたすことが問題とされていた。

そこで、今回ビームスプリット機構を視準レンズ口に付加することで、目視視準とカメラ観察を同時

に行うことができるよう装置の改良を行った。これにより、上記問題を解決すると共に、小型のCMOSカメラを採用することで、視準レンズ周辺の機構を非常にコンパクトにすることに成功した(図-2)。

採用したビームスプリッタは、立方体形状の対角面がハーフミラー状になっている(図-3)。透過と反射の比率は50:50である。

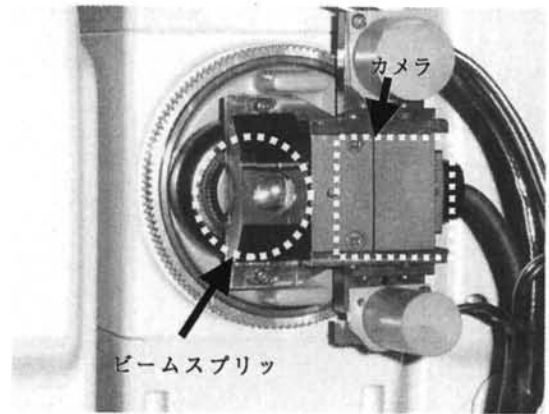


図-2 接眼部カメラ取り付け状態

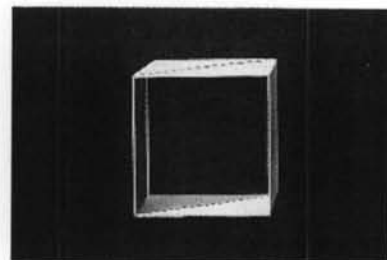


図-3 ビームスプリッタ

### 2.3 無線遠隔操作機能

計測中三脚やTSに触れることは、計測を乱す要因となり易い。そこで極力TSに触れることを避けるために、今回無線による制御が可能になるパソコンを採用した。本体はケースに格納し三脚部分に取り付けられる(図-4)。

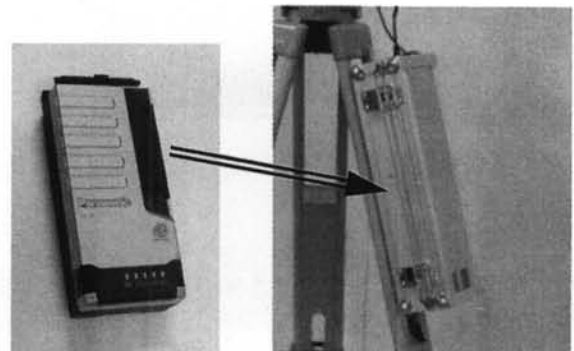


図-4 パソコン本体の搭載状態



図-5 操作ディスプレイ

同PC (Panasonic社製 PRONOTE AirFG CF-07)は、画面への情報転送に無線LAN規格を採用しており、本体の操作を手元の画面(図-5)を通して行うことができる。

#### 2.4 扁平への対策

ターゲットの取り付け状態は、カメラに対して正対する向きであることが望ましい。しかし、測定する場所によっては、その向きが斜めになるために図-6のように扁平した状態で写るケースが発生する。その場合、従来の装置では相当する円形をテンプレートにして画像照合を行うが、この方法では扁平楕円の短軸方向の精度に誤差を生じる結果となる。

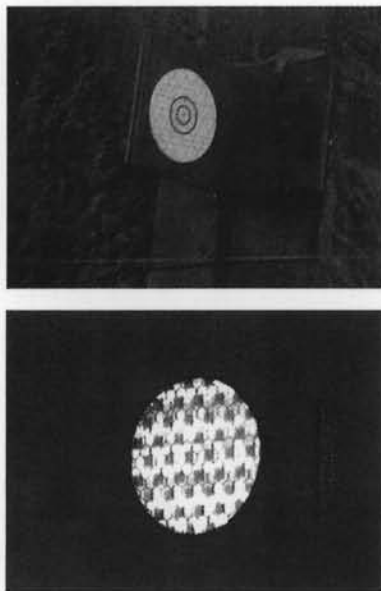


図-6 ターゲット取付状態と画像例  
上：トンネル内取付状況 下：入力画像例

そこで、今回のシステムでは、楕円に写る場合に対しても対応できるように画像処理機能の強化を行った。一旦、画像を取り込みターゲットと推定される領域の長軸短軸長さを求め、同情報を元に楕円型のテンプレートを参照することにより、高精度マッ

チングを実現できる。

図-7は楕円マッチングの事例であるが、左は円形テンプレートマッチング、右が楕円テンプレートマッチングである。左の結果は、短軸方向にずれているため、ターゲットの位置に対して抽出円(白い円)にずれがある。一方、右の結果は、正確にターゲットを捉えているため抽出円の位置もターゲットに一致している。

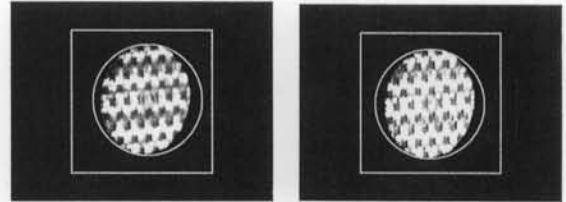


図-7 楕円マッチング事例  
左：円形マッチング 右：楕円マッチング

#### 2.5 計測装置概要

計測装置の概観を図-8に示す。現地での計測はこの状態で利用する。

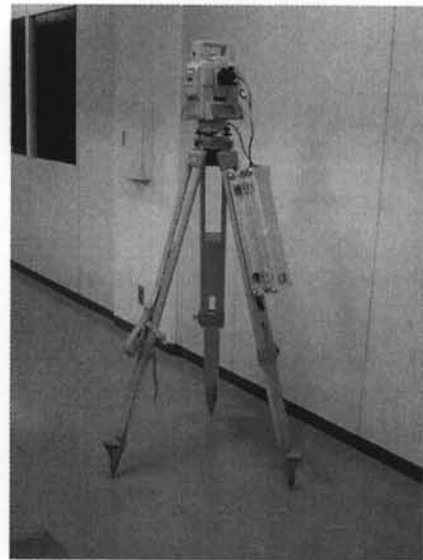


図-8 装置概観

### § 3. 検証実験

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3.1から3.3に示す。

#### 3.1 計測精度試験

同一点に対する計測精度検証実験の結果を図-9、10に示す。最初の実験は、TSを固定した状態に

置き、異なる距離の計測点に対して、概略合わせ、測距、画像計測を各1回行い、各点の平均値からの誤差を表示した結果である。

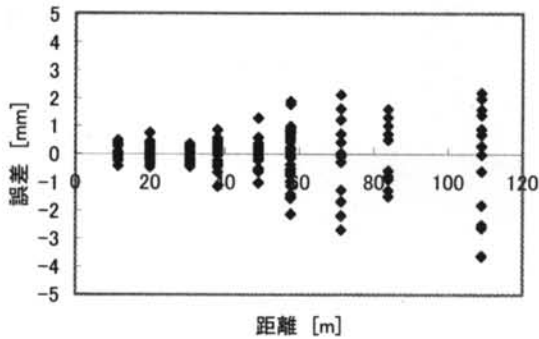


図-9 計測精度検証 (1回計測)

次の実験は、概略合わせ、測距、画像計測を各3回行い、その平均値を採用する方法で計測した結果である。本装置でこれらの操作はすべて自動的に行うことができる。

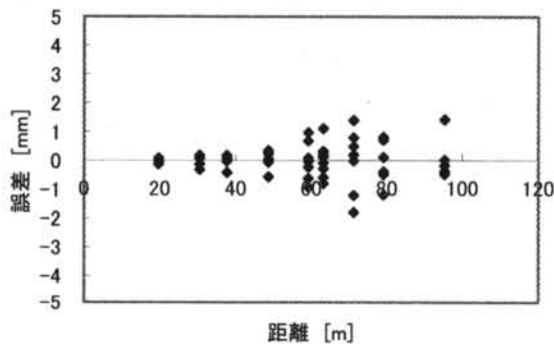


図-10 計測精度検証 (3回平均)

1回の計測では、やや誤差の大きい結果となっているが、3回平均では、誤差はほぼ2mmに納まっている。人による、目視による位置合わせの精度が約3秒(100m離れて1.5mm程度)といわれているので、同システムは目視による計測と同程度の精度を達成していると考えられる。

### 3.2 扁平対応による効果の検証

ターゲットが扁平状態に写る状態に対して、提案方式の効果を検証するために、自己位置計算による検証を行った。これは、TSを固定した状態でターゲットが正対して写る状態と、扁平して写る状態で観測し、自分の位置(TSの3次元座標と向き)を計算した際の位置座標のばらつきを見ることで検証した。

なお、この計測は実測作業においては基準位置からTSの位置を逆算する手順に相当する。

図-11にターゲットとTSの配置を上から見た場合の状況を示す。ターゲットを正対させた場合(図-11右)は、像も真円に近い円形マッチングでもずれが生じにくい。しかし、図-11左の配置の場合、ターゲットの像は楕円状に写る。これを従来の円形マッチングで計測した場合、横方向へのずれが生じ易い。現場計測においては、ターゲットの取り付け位置としてこのような状況が避けられない場合も多い。

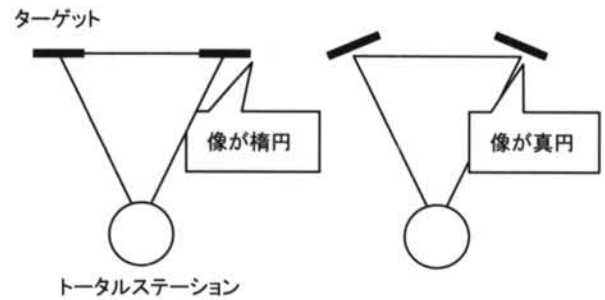


図-11 ターゲットの向きとトータルステーションの配置：上から見て正三角(自己位置計算用)  
[ターゲット向き 左:非正対 右:正対]

表-1 トータルステーション自己位置計測結果

配置	向き	楕円対策	TS 自己位置計算(3次元座標XYZ[m]、方向 $\alpha$ [deg])				
				1回目	2回目	3回目	振れ幅
正三角	正対・真円	無	X	3.5848	3.5856	3.5846	0.0010
			Y	7.6888	7.6885	7.689	0.0005
			Z	-0.6864	-0.6862	-0.6861	0.0003
			$\alpha$	167:16:00	167:15:41	167:16:00	00:19
	非正対・楕円	有	X	3.5978	3.6008	3.6048	0.0070
			Y	7.6693	7.6676	7.6664	0.0029
			Z	-0.5248	-0.5246	-0.5248	0.0002
			$\alpha$	167:15:40	167:14:45	167:13:31	02:09
有	有	X	3.2466	3.2467	3.2457	0.0010	
		Y	7.5848	7.5844	7.5838	0.0010	
		Z	-0.7710	-0.7712	-0.7709	0.0003	
		$\alpha$	168:47:15	168:47:09	168:47:37	0:00:28	

表-1に各配置において自己位置を計算した結果を示す。この結果からも、楕円対策が無い場合、ターゲットを正対させた場合と非正対では、特に角度においてばらつきが大きくなることがわかる。

この結果に対して、楕円計測対策を施した場合、そのばらつきが位置・角度共に小さくなっていることがわかる。

実測作業においてはこの自己位置計算の後、各観測点の計測に移るが、最も誤差に影響を与えるのは角度である。同結果は、楕円対策の効果を示しているが、実測においては基準位置計測用のターゲットは、極力正対させて計測したほうが良い結果に繋がるとも考えられる。

### 3.3 計測時間

計測時間については、各1点あたりの計測時間を取得した画像の時間間隔より概算した。1点あたりの計測の手順を、「計測指示」—「自動方向合わせ」—「画像取得」—「計算結果出力」として、これらの手続きを5点に関して自動計測した場合の平均を求めると約28秒程度となった。ただし、計測対称の状況により計測時間にばらつきも多く20秒から40秒とその幅も大きい。

現在、計測に多くの時間がかかっている部分は、巡回時の停止位置収束時間と、画像取り込みから処理に至る部分である。後者の画像取り込みの部分であるが、現在のバージョンは外部プログラムの間接制御を利用しているため時間を要しているが、次期バージョンでは直接メモリに転送できるため、かなりの高速化が測れると考えられる。前者の巡回位置収束に関しては、機械上の制限のため現在のところ対策はTS内部の修正しかない。

一方、この計測を目視で行った場合、1点あたりの計測は熟練した作業員で、ほぼ同程度の計測時間(30秒)になると考えられる。しかし、方向を合わせる作業は点数が多くなるにつれ、確認が煩雑になるため、計測時間のばらつきも、同システムのような±10秒を大きく上回るケースも多くなる。

また、視準作業も実際に視準レンズを覗いて、ダイヤルで方向をターゲット中心に合わせる作業も、習熟度により差は大きくなると考えられる。

これらを考え合わせると、計測時間に関しても同システムは安定した高速性を有していると考えられる。

### 3.4 現場における実証実験

掘削施工中のトンネル現場にて同装置の運用試験を行った。協力頂いた現場は群馬県内のトンネル工事現場で、ハツ場ダムの建設に伴うJR吾妻線付替工事のためのトンネルを新設するものである。同工事は、鉄道トンネルとしては国内初の全断面TBM工法を採用した工事であるが、TBM発進坑のNATM工事部分における測量において今回の装置を利用した。

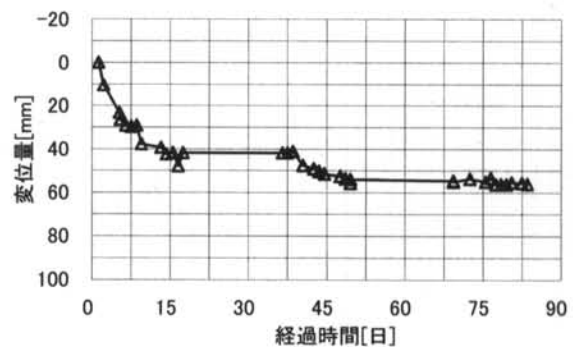
計測期間は、2003年初頭より試験的に利用を開始し、同年9月現在も利用を継続している。



図一12 トンネル工事現場入口部ならびに計測状況  
上：トンネル入口部 下：トンネル内

図一13に計測に利用した結果として天端沈下の計測事例を示す。

沈下の様子から収束に至るまでの状況をほぼ捉えていることがわかる。当該現場においては、同時にメジャーによる検証も行っているが、同様の傾向を捕らえており、同計測システムが実用計測を行えることを検証することができている。



図一13 天端沈下計測事例

#### § 4. おわりに

サーボ機能つきTSと、その視準画像を自動処理する機能を合わせ、複数のトンネルの内空変位観測用ターゲットを自動的に計測する装置を開発した。人による視準合わせ操作の必要がほぼ無くなり、短時間・少人数での計測が可能となる。

同装置の開発は、ほぼ完了しているが、現場での運用を通して幾つか機能強化する必要がある点が

示されている。一つは、前々回計測点等の参照、今ひとつは、旋回時の時間短縮がある。今後はこれらの点を修正し、システムとしての完成度を上げる予定である。

#### 謝辞

今回の開発に当たりご協力頂いた八ッ場トンネル工事作業所茅野浩一工事長ならびに計測担当者の皆様に感謝いたします。

#### <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) 竹内啓五, 和田孝史, 泉谷泰志, 宮下国一郎, 厨川弘樹: “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” 清水建設研究報告, Vol.71, pp89-94, 2000.4
- 3) 竹内啓五, 和田孝史, 泉谷泰志, 宮下国一郎, “トンネル内空変位計測システムの開発”, 電力土木, No.292, pp39-43, 2001
- 4) 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
- 5) 金谷健一: “画像理解”, 北森出版, 1990