

# プロジェクションマッピングを用いた計測表示システムと 山岳トンネル掘削工事における実証試験

青野 泰久 竹内 啓五 中谷 篤史  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

## Application of projection mapping system to tunnel excavation management and empirical test at mountain tunnel

Yasuhisa Aono, Keigo Takeuchi and Atsushi Nakaya

三次元レーザースキャナとプロジェクションマッピングを組み合わせた計測表示システム“SP-MAPS®”を開発した。これは、任意形状の対象物の表面上に計測データを常時表示するシステムであり、その場にいる人に伝えたい情報を画像で分かり易く認識させることができる。現在、山岳トンネルの工事では、人手による天端、側壁、底部等の掘削面の施工管理が行われており、省人化、省力化、安全性の向上が大きな課題となっている。これらの課題に対し、実際の山岳トンネルの掘削工事に SP-MAPS®を適用し、課題の合理化が図れるかを実証した。掘削面に掘削の過不足を示す画像を照射して所定の作業を行う場合と、従来の人手のみの作業との比較を行い、SP-MAPS®の有効性と問題点を確認した。本報告は SP-MAPS®の概要、および実証試験の結果から得られた課題、展望等をまとめたものである。

A measurement and its visualizing system, SP-MAPS® (Scanning and projection mapping system) has been developed. SP-MAPS® is an integration of the three-dimensional scanner and the projection mapping technology. SP-MAPS® makes easy to understand the measured data by projecting the image of measured data on any complex surfaces. In mountain tunneling, excavation degree of the crown, side, and invert are controlled by using a marked rod and a string. This management work has some problems such as time-consuming, requires more manpower, and entails greater risk of injuries and accidents. To make sure effectiveness of SP-MAPS®, an empirical test has been carried out during invert excavation of an actual mountain tunnel. In this paper, the specification of SP-MAPS® and results of the empirical test are presented. And also, the effectiveness and the problems are described for future practical use of SP-MAPS®.

### 1. はじめに

山岳トンネルでは内空と支保工の厚さを確保するために、天端、側壁、底部等の掘削の管理が行われている。この管理は作業員が掘削箇所に立ち入り、目視や掘削形状に合わせて作った定規、水系、目印を付けた棒等を使用し行われており、特に図-1に示す底部のインバートの掘削管理には、①検尺作業に手間と時間を要する(省力化)、②複数人で作業を行う必要がある(省人化)、③作業員が足場の不安定な箇所に立ち入るため、転倒や崩落、重機に接触する危険性が伴う(安全性)という課題があった。特に、①に関しては合計で1時間以上の時間を要する場合がある。

一方、近年山岳トンネルの施工管理に三次元レーザースキャナ(以下、3D スキャナ)が活用される

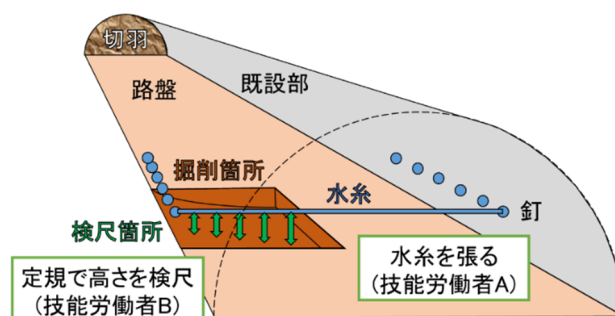


図-1 インバートの掘削管理方法

事例が増えており、3D スキャナによりトンネル壁面の変形量を求めるシステムも開発されている。これらのシステムでは、計測対象物の形状を面的に捉えることができるが、PC等の画面上で間接的に情報を認識する技術がほとんどである。

筆者らは、作業箇所を対象物の表面上に計測データを常時表示し、その場にいる人が直接的に知りたい情報を認識することができる計測表示システム“SP-MAPS®”を開発し、山岳トンネルの掘削管理への適用を進めている<sup>2)</sup>。SP-MAPS®の活用により、3D スキャナによる掘削箇所の形状計測結果と設計データとの差異を画像化し、掘削箇所に照射することで、その情報を見ながら掘削を行うことが可能となる。このシステムは前述した省力化、省人化、安全性の課題に対し、①面的に掘削箇所の形状データを数十秒で取得可能、②一人でシステムの運用(設置・計測・画像の照射)が可能、③検尺で掘削箇所に立ち入る必要がなく、安全性が向上するという利点がある。

本報告では SP-MAPS®で使用する機材、実施手順の概要と、当社施工の山岳トンネルのインパットの掘削箇所にて実施した実証試験の結果を示し、本システムの有効性と課題について整理する。

## 2. SP-MAPS®の概要

### 2.1 機材

SP-MAPS®で使用する機材と 3D スキャナの計測結果の座標軸を図-2 に示す。SP-MAPS®では、3D スキャナとプロジェクタが一体となった形状計測・照射装置(以下、装置)を用いる。3D スキャナにより対象物を計測した結果は、スキャナの中心を原点Oとした装置座標系 $E=(\xi, \eta, \zeta)$ の座標値を持った計測点の集合(点群)として記録される。使用する 3D スキャナは、測距精度 $\pm 40\text{mm}$ の市販のレーザースキャナである。画像を照射するプロジェクタの輝度は5000lmである。プロジェクタ自体は防塵、防滴仕様ではないため、プロジェクタをアルミ製の防塵・防滴ボックスに格納している。装置に接続している PC

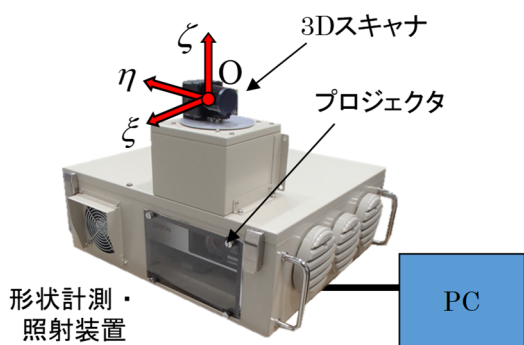


図-2 機材と計測結果の座標軸

は、点群の分析、画像の作成、作成した画像をプロジェクタで照射するために使用する。

### 2.2 全体フロー

図-3 にシステムの実施手順を示す。SP-MAPS®は 2 種類の方法で装置の姿勢、原点位置を推定できる仕様である。1 つ目は、装置に設置する 3 個のプリズムとトータルステーション(以下、TS)を用いる一般的な方法(以下、方法 1)である。TS とは、距離

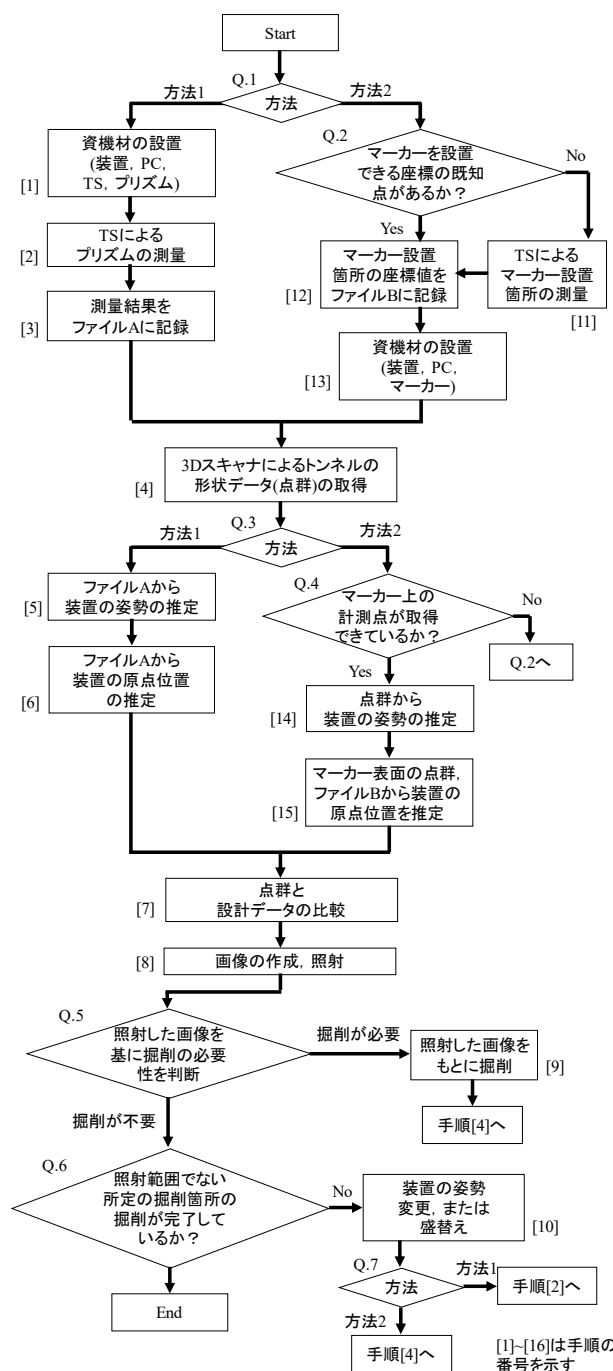


図-3 システムの実施手順

[1]~[16]は手順の  
番号を示す

を測る光波測距儀と角度を測る経緯儀を組み合わせた測量器械である。2 つ目は、本システム構築の際に、新たに開発した方法であり、装置の 3D スキャナで取得したトンネルの既設部の点群と、図-4 の半球ドーム状マーカー(以下、マーカー)を使用する方法である(以下、方法 2)。マーカーは磁石により鋼製支保工に設置する。方法 1 は掘削箇所の形状計測結果を設計データと精度よく比較することに優れており、方法 2 は掘削の進行に伴い装置を効率よく盛替えることに優れている。図-3 の左側が方法 1、右側が方法 2 の手順である。また、図-5 は両者の資機材の設置例、図-6 は方法 2 における装置の姿勢の推定方法である。本システムの実施手順は、大まかに以下に分類される。

- ・ 3D スキャナの計測前の準備(手順[1]~[3]、[11]~[13])
- ・ 3D スキャナの計測(手順[4])
- ・ 装置の姿勢と原点位置の推定(手順[5]~[6]、[14]~[15])
- ・ 照射する画像の作成、照射(手順[7]~[8])

- ・ 掘削、装置の姿勢変更または盛替え(手順[9]~[10])
- 以下、各方法の作業手順について解説する。

## 2.3 作業手順(方法 1 TS とプリズムを使用)

### 2.3.1 3D スキャナの計測前の準備(手順[1]~[3])

装置の姿勢、原点位置の推定に TS とプリズムを使用する場合の資機材の設置例を図-5(a)に示す。手順[1]では、装置、PC、TS を掘削箇所近傍に設置し、図-5(a)に示す位置に 3 個のプリズムを装置に取り付ける。次に手順[2]では TS でプリズムを測量する。その後、手順[3]では測量結果を設定ファイル A に記録する。この測量結果はトンネルの  $n$  番目の断面の座標系  $\mathbf{X}_n = (x_n, y_n, z_n)$  をもとに得られる(以下、断面座標系)。図-7 に断面座標系を示す。断面

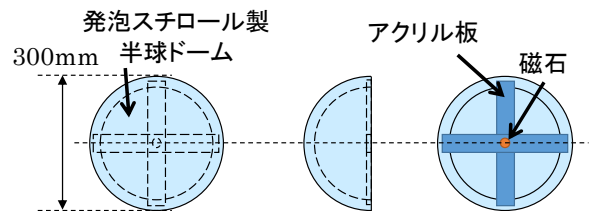


図-4 半球ドーム状マーカー

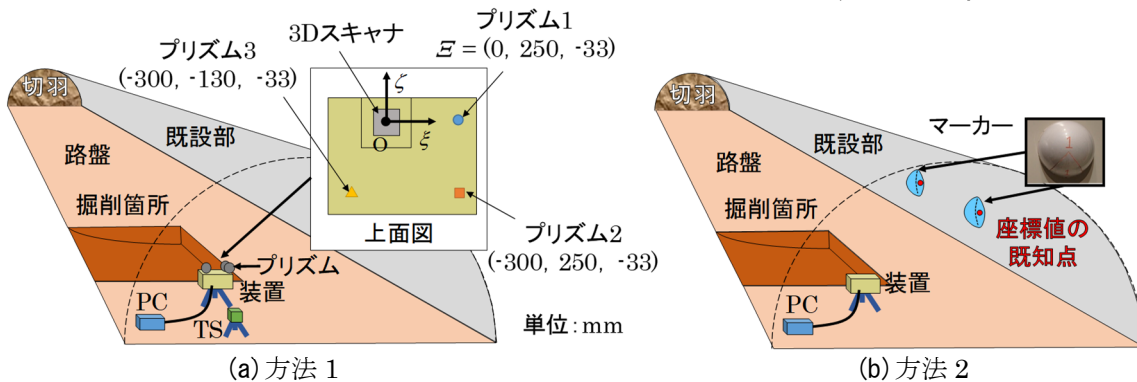


図-5 資機材の設置例

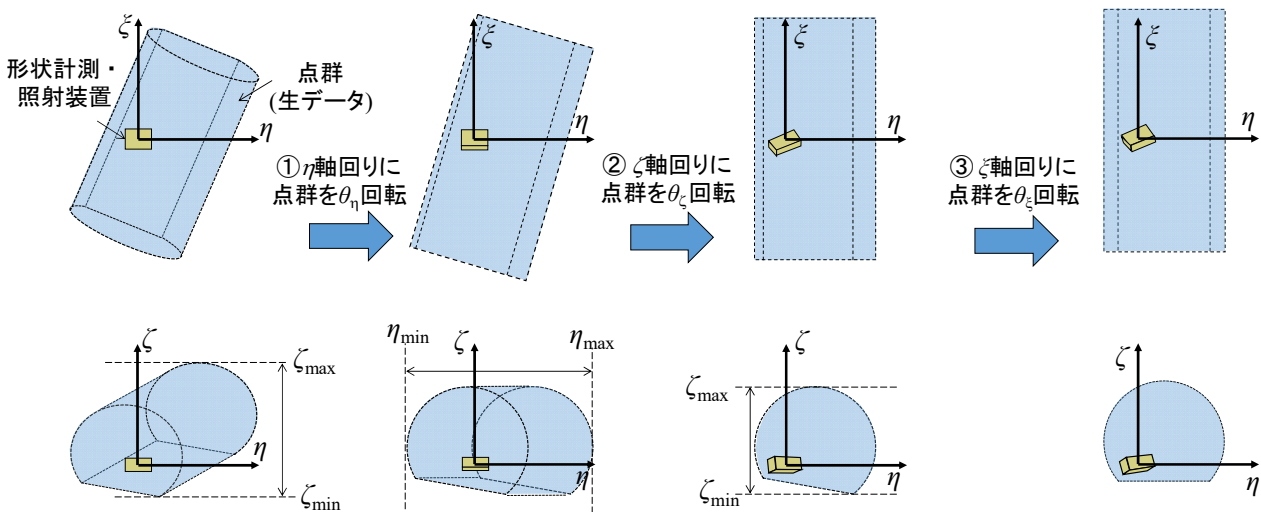


図-6 方法 2 における装置の姿勢の推定方法

座標系では、支保工のセンターライン(C.L.)とスプリングライン(S.L.)の交点が原点  $O_n$  である。断面座標系  $X_n$  における  $x_n$  軸はトンネルの進行方向、 $y_n$  軸はトンネルの断面の横断方向、 $z_n$  軸はトンネルの断面の鉛直方向を示す。

### 2.3.2 3D スキャナによる形状計測(手順[4])

手順[4]では 3D スキャナにより、トンネルの掘削箇所の形状データの取得を行う。形状データは約 5cm 間隔の計測点の集合である点群で構成される。

### 2.3.3 装置の姿勢(回転角)推定(手順[5])

手順[5]では、TS によるプリズムの計測結果からトンネル内における装置の姿勢を求める。まず TS によるプリズムの測量結果から、装置が設置してある断面座標系  $X_n$  を推定する。その後、断面座標系のプリズムの座標値から装置座標系  $S$  と断面座標系  $X_n$  の軸の方向が一致する回転角を求める。回転行列を用い、 $x_n$  軸回りにプリズムの座標値を回転させた場合にプリズム 2、3 の  $z_n$  軸方向の座標値  $z_2$ 、 $z_3$  が一致する回転角  $\theta_x$  を求め、TS で測量したプリズムの座標値を  $x_n$  軸回りに  $\theta_x$  回転させる。以下、同様に  $z_n$  軸、 $y_n$  軸回りの回転角  $\theta_z$ 、 $\theta_y$  を求める。ここでは回転角  $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$  を装置の姿勢を示すパラメータとしており、装置座標系  $S$  の軸がトンネルの断面座標系  $X_n$  の軸と一致している状態から、装置が  $y_n$ 、 $z_n$ 、 $x_n$  軸回りに  $-\theta_y$ 、 $-\theta_z$ 、 $-\theta_x$  回転した姿勢であることを示す。方法 2 と比較を行うために、このような角度の算出を行っている。

### 2.3.4 装置の原点位置推定(手順[6])

装置の原点位置推定に関しては、プリズムの設置位置とスキャナの相対位置は既知であることを利用し、TS によるプリズムの測量結果から推定を行う。

### 2.3.5 点群と設計データの比較(手順[7])

装置の姿勢、原点位置推定結果から点群を座標変換し、設計データにおける計画面と点群との距離を求める。その後、図-8 に示すように、計画面から所定の距離の線をトンネルの断面の内側と外側に引き、どの二本の線の内側に点群が存在するか判定を行う。例えば、計画面より内側にある点群には掘削が必要である判定をし、設計データの形状よりも外側にある点群には掘削が不要である判定を行う。ここでは、掘削の過不足の量に対応する色の情報を、点群を構成する計測点に付与する。なお、手順[7]~[10]は後述する方法 2 と同じ作業である。

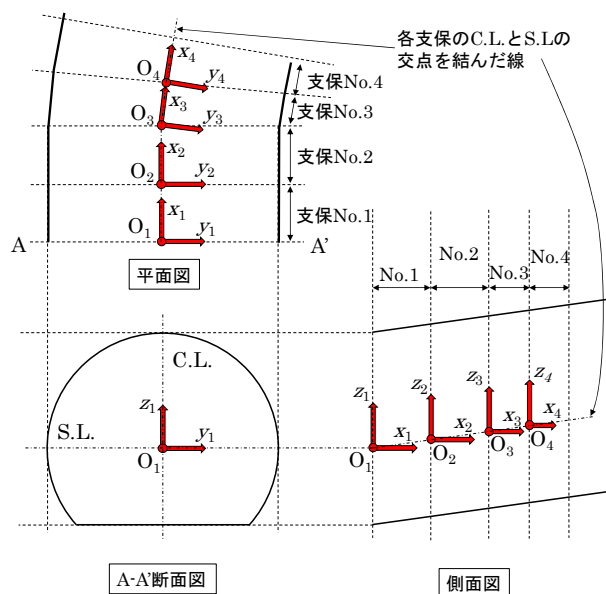


図-7 トンネルの断面の座標系

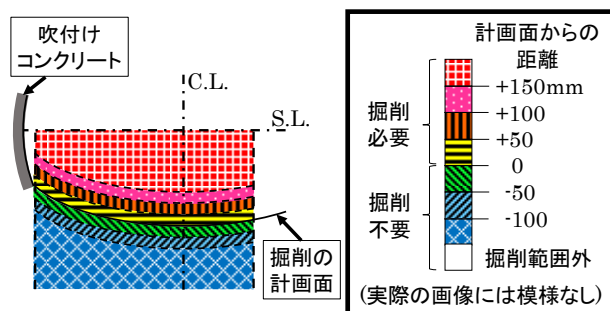


図-8 照射する色と領域の関係

### 2.3.6 画像の作成、照射(手順[8])

手順[8]では、手順[7]の点群の掘削の過不足の判定結果をもとに、掘削箇所に照射する掘削の過不足を示す画像を作成する。画像の作成方法を図-9 に示す。画像は面積を持った点群、すなわち基本図形の集合で構成され、本システムでは円を採用した。掘削の過不足を判定した点  $A(a, b, c)$  に正確に判定結果が照射されるように、PC 画面の画像上の点  $A'(d, bd/la, cd/la)$  に円をプロットする。すなわち、この画像を照射すると、点  $A'$  にプロットされた円が点  $A$  に照射される。ここで  $d$  は事前に求めたプロジェクタで PC の画面が平面に照射されたときの画像の大きさと、PC の画面に表示している画像の大きさが一致する距離である。プロットする円の色には、手順[7]にて判定を行った際に計測点に付与された色情報を使用する。作成した画像はプロジェクタで掘削箇所に照射される。



### 2.3.7 掘削、装置の姿勢変更、盛替え(手順[9]、[10])

手順[9]では、作業員は照射された色情報から掘削の過不足を判断し、照射範囲の掘削が不足している分の掘削を行う。所定の掘削の作業が終了した後に再度3Dスキャナで掘削箇所を計測、プロジェクタで画像の照射を行う。これらの一連の計測、照射の作業を、必要な精度で掘削面が掘削されるまで繰り返し実施する。

照射範囲が所定の掘削箇所全体をカバーしていない場合は、装置の姿勢の変更や、装置の盛替えを行う(手順[10])。方法1では装置の姿勢、原点位置が変化した場合、手順[2]に戻り、再度TSで装置に設置したプリズムを測量し、設定ファイルAを更新する必要がある。

## 2.4 作業手順(方法2 点群とマーカースを使用)

### 2.4.1 3Dスキャナの計測前の準備(手順[11]~[13])

点群と図-4のマーカースを装置の姿勢、原点位置の推定に使用する場合の資機材の設置例を図-5(b)に示す。方法2では図-5(b)に示すように、マーカースを設置するための、断面座標系 $X_0$ 座標が既知な箇所が2箇所存在しない場合、TSで測量を行い、座標を取得する(手順[11])。2箇所の座標が既知の場合、手順[11]は省略できる。手順[12]ではマーカースを設置する箇所の座標を設定ファイルBに記録する。その後、手順[13]では、装置、PCを掘削箇所近傍に設置し、手順[12]で設定ファイルBに入力した座標値の箇所にマーカースを設置する。

### 2.4.2 3Dスキャナによる形状計測(手順[4])

方法1と同様に、機材の設置後、3Dスキャナによる計測を行い、スキャナから約±20mの距離にあるトンネル内の掘削箇所および既設部の形状データ(点群)の取得を行う。マーカース表面上の点群の位置座標が取得できている場合は、手順[15]の装置の姿勢の推定に進む。位置座標が取得できていない場合は、Q.2に戻る。

### 2.4.4 装置の姿勢(回転角)推定(手順[14])

手順[14]では、3Dスキャナの計測結果からトンネル内における装置の姿勢を求める。方法2における装置の姿勢の推定方法を図-6に示す。ここでは回転角 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$ を装置の姿勢を示すパラメータとしており、装置の座標系 $S$ の軸がトンネルの断面座標系 $X_0$ の軸と一致している状態から、装置が $x_0$ 、 $z_0$ 、 $y_0$ 軸回りに $-\theta_x$ 、 $-\theta_z$ 、 $-\theta_y$ 回転した姿勢であることを示す。

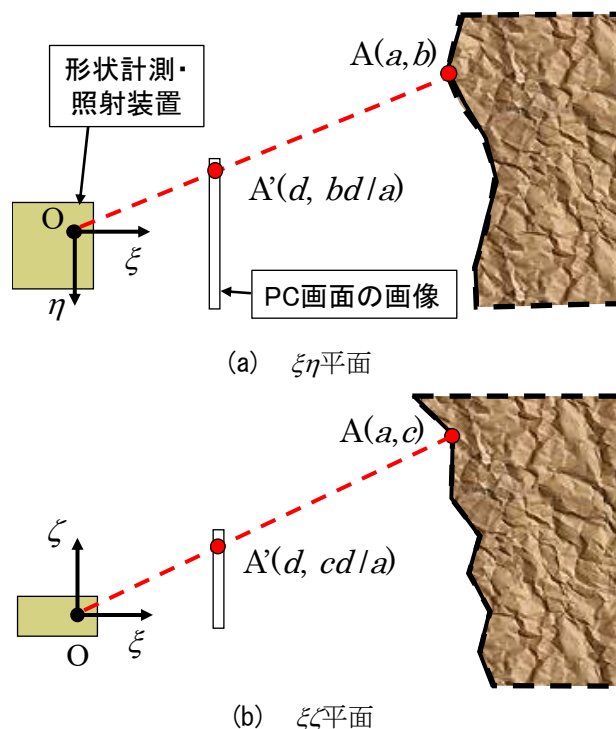


図-9 画像の作成方法

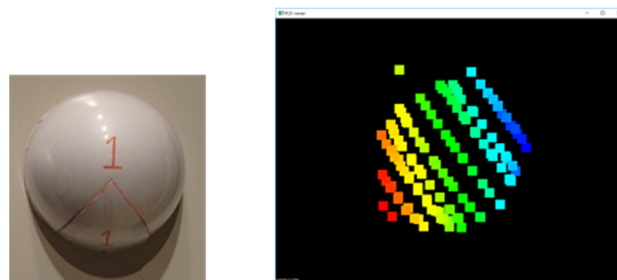


図-10 半球ドーム状マーカースと表面の点群

方法2では、3Dスキャナにて計測したトンネル内の掘削箇所および既設部の数十万点の点群の座標値の最小値、最大値の差から、装置の姿勢を推定する。例えば、まず点群を $\eta$ 軸回りに回転させ、 $\zeta$ 軸方向の座標値に着目し、座標値の最大 $\zeta_{max}$ 、最小 $\zeta_{min}$ の差が最小になる $\eta$ 軸回りの回転角度 $\theta_\eta$ を求め、 $\eta$ 軸回りに点群を $\theta_\eta$ 回転させる。以下、同様の作業を $\zeta$ 軸、 $\xi$ 軸に関して実施し、 $\zeta$ 軸、 $\xi$ 軸回りの回転角 $\theta_z$ 、 $\theta_x$ を求める。トンネルの長手方向に勾配が存在する場合は、回転角 $\theta_\eta$ から勾配の角度 $\theta_{grad}$ を差し引いた値を $\eta$ 軸回りの回転角とする。

### 2.4.5 装置の原点位置推定(手順[15])

装置の原点位置推定に関しては、まず、図-10に示すようなマーカースの表面の点群を抽出し、最小二乗法によりマーカースの中心の座標、すなわち、設定ファイルBに入力した座標と装置の相対座標を求める。トンネル座標系におけるマーカースの中心の座標

2) 点が既知で、スキャナとマーカの中心の座標 2 点の相対位置がわかるので、後方交会法を用いてトンネル座標系におけるスキャナの位置を推定する。

3) 資機材の設置から画像の照射までに要する時間  
4) 方法 2 の装置の姿勢・原点位置推定結果の誤差  
5) 照射された画像の誤差

### 2.4.6 点群と設計データの比較～装置の姿勢変更、盛替え(手順[7]～[10])

装置の原点位置推定後の手順[7]～[10]は方法 1 と同様であるが、方法 2 の場合、理論上、マーカ表面の点群の位置座標が得られれば、装置の姿勢、原点位置の変化に関わらず、所定の掘削が完了するまで手順[4]～[10]の作業を繰り返し実施すればよいため、方法 1 と比べて方法 2 は簡易かつ短時間で盛替えが可能である。

1)は通常の作業環境でも、輝度が 5000lm のプロジェクタを用いて、茶色や黒色の掘削箇所画像を照射した場合に、画像の色が明確に視認できるか確認した。3)は方法 1、2 による手順[10]の掘削作業以外の一連の作業を実施し、その後装置の盛替えを行い、再度画像の照射までに要する時間を調査した。4)では、TS の測距精度は±1mm であることから、TS のみを用いる方法 1 により推定した装置の姿勢・原点位置を真値と仮定し、方法 1、2 の推定結果の差から、考案した方法 2 により推定した装置の姿勢、原点位置が含む誤差を調査した。5)では、TS で掘削面の形状を直接測量し、照射された画像と設計データに基づく色分けとの誤差を評価した。測量には、掘削面の形状の保護と安全性の観点から、掘削箇所には立ち入らずに測量を行うノンプリズム方式を採用した。TS のノンプリズム方式での測距精度は±2mm であり、3D スキャナの測距精度である±40mm に比べ小さいことから、TS での測量結果を真値と仮定した。なお、ここでは、TS により測量した箇所の座標値と、図-12 に示す本システムで求めた

## 3. 実証試験

### 3.1 試験方法

当社施工の山岳トンネルのインバートの掘削箇所にて計測、照射試験を行った。資機材の配置図を図-11 に示す。坑口から切羽に向かって左側を掘削している場合に試験を行った。上下半の鋼製支保工の接合部のプレートの中央の座標値を事前に TS で求めており、その部分にマーカを設置した。装置、PC、TS は掘削箇所近傍に設置し、装置は掘削箇所に画像が照射されるように傾けて三脚に設置した。プリズムは図-5(a)に示す装置の上面の 3 か所に設置した。本実証試験では、点群の存在する領域を 50mm ごとに分割し、その分割した領域ごとに照射する画像の色を変化させた(図-8 参照)。

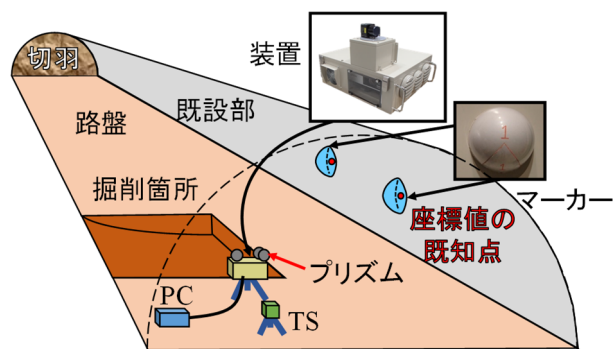


図-11 実証試験時の資機材の配置図

### 3.2 評価項目

実証試験の評価項目を以下に示す。

- 1) 照射した画像の視認性
- 2) 照射の領域

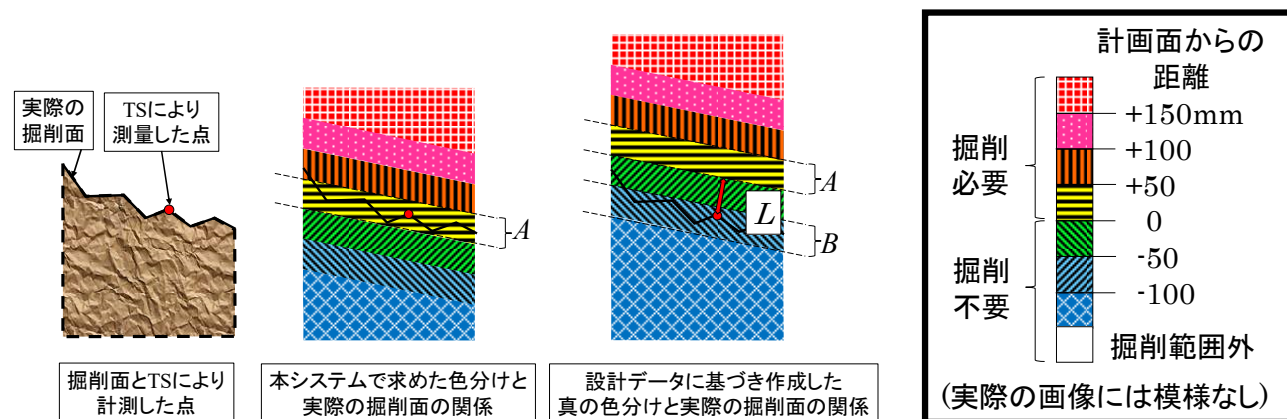


図-12 照射の精度の評価方法

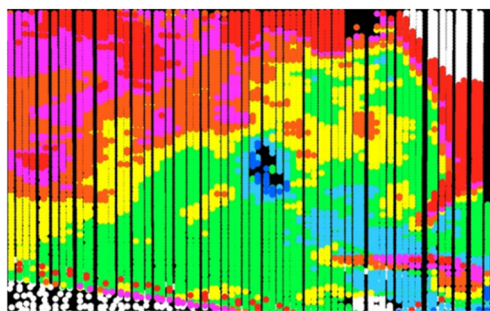


図-13 方法2により作成した画像

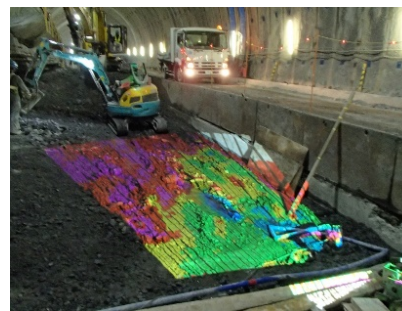


図-14 画像の照射中の様子

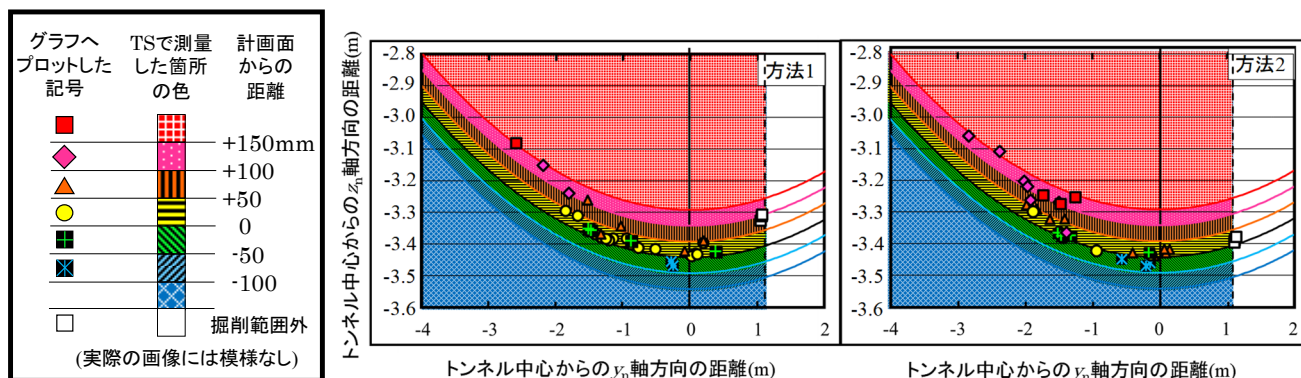


図-15 TSで測量した照射箇所の色、測量した位置、設計データに基づく掘削の過不足を示す真の色わけ

表-1 装置の姿勢を示すパラメータの推定結果と両者の差(°)

計測	方法1			方法2			差		
	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$	$\theta_x$ と $\theta_x$	$\theta_y$ と $\theta_y$	$\theta_z$ と $\theta_z$
1回目	162.79	-8.55	-17.02	162.90	-8.18	-16.51	0.11	0.37	0.51
2回目	162.79	-8.55	-17.02	162.86	-8.53	-16.86	0.07	0.02	0.16

表-2 装置の原点位置の推定結果と両者の差(mm)

計測	方法1			方法2			差		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1回目	260263.8	-388.6	-1573.7	260291.2	-328.7	-1531.8	-27.4	-59.9	-41.9
2回目	260263.8	-388.6	-1573.7	260271.0	-328.5	-1540.9	-7.1	-60.1	-32.7

色の領域までの最短距離を求め、照射された画像の誤差  $L$  とした。例えば図-12では、領域Aの色が照射されている箇所をTSのノンプリズム方式で測量し、得られた座標値が領域Bのある位置に存在する場合の  $L$  を示している。

#### 4. 結果、考察

図-13に方法2により作成した画像、図-14に方法2により作成した画像の照射中のインバート掘削箇所の様子、図-15にTSで測量した照射箇所の色、

測量した位置、設計データに基づく掘削の過不足を示す真の色わけの関係、表-1に方法1、2から推定した装置の姿勢のパラメータと両者の差、表-2に方法1、2から推定した装置の原点位置と両者の差を示す。図-15のグラフ上にプロットしている点の色は、TSで測量した箇所の色を示し、TSでの測量により得られた断面座標系の座標に点をプロットしている。測量した点は断面座標系のトンネルの進行方向の座標値  $x$  の位置が異なるが、グラフにまとめてプロットしている。縦軸、横軸はトンネル中心から

の  $z_n, y_n$  軸方向の距離を示す。グラフの背面の色は、設計データに基づく真の掘削の過不足を示す色わけを表す。

本システムの掘削以外の作業は1人で実施し、掘削箇所に入り込まずに掘削箇所の掘削の過不足を示す画像を照射することができた。したがって、本システムは従来の作業方法に対し、省人化、安全性の向上に貢献することを確認した。

以下に各検討項目に対する結果、考察を示す。

#### 4.1 照射した画像の視認性

今回の試験では装置と掘削面までの距離が約10mとなるように装置を設置し、作業箇所の照度を変更せずに画像の照射を行った。図-14に示すように、5000lmの 프로젝タを用いて、茶色や黒色の掘削箇所に画像を照射した場合でも、画像の色を明瞭に識別できることを確認した。

#### 4.2 照射の領域

今回の試験では画像が照射される領域の幅が約4m、奥行きが約8mであり、図-14に示すように掘削領域全体を照射することができなかった。これを解決するためには、照度の大きい 프로젝タを導入し、装置と掘削面までの距離を大きくする、また、作業空間に余裕がない場合は魚眼レンズのような広角レンズを使用して照射範囲を広げる等の対策が考えられる。

#### 4.3 資機材の設置から画像の照射までに要する時間

方法1における手順[1]~[3]、方法2における手順[12]~[14]に要する時間は約15分と概ね同じであった。また、方法1、2ともに3Dスキャナによる形状計測から 프로젝タによる画像の照射までの時間は約1分であった。すなわち、従来の検尺方法では作業に1時間以上時間を要していたが、本手法では方法1、2ともに20分以下で作業を実施でき、本システムの有効性を確認した。

また、装置の盛替えから照射までに要する時間は、方法1では約10分、方法2では約1分であった。方法2は装置の盛替えにより装置の姿勢、原点位置が変化しても、マーカーの表面の点群が取得できていれば、盛替え後ただちに手順[4]の3Dスキャナの計測作業に取り掛かることができ、装置の姿勢の変化や盛替えを行う機会が多いトンネルの掘削作業では、方法2の方が作業の時間を短縮できることを確認した。

#### 4.4 回転角、原点位置の推定結果の誤差

表-1より、今回の試験では両者の回転角の差は最大で $0.51^\circ$ であった。これは、方法2では前述のとおり、トンネルの既設部の数十万点の形状計測結果から装置の姿勢を推定しており、誤差の原因として3Dスキャナの測距精度と、吹付けコンクリートの表面の凹凸が挙げられる。しかし、吹付けコンクリートの表面の凹凸は10mm程度であり、3Dスキャナの測距精度が誤差に及ぼす影響が大きいと考えられる。

また、表-2より、両者の断面座標系の  $x, y, z$  の各座標値の差の絶対値の最大は60.1mmであった。方法2の装置の原点位置の推定結果は $\pm 60.1\text{mm}$ の誤差を含むことを確認した。2.3.5、2.4.6項に前述したとおり、装置の姿勢、原点位置推定結果から点群を座標変換し、設計データにおける計画面と点群との距離を分析し画像を作成しており、この誤差は4.5節で後述する照射された画像の誤差に影響を与えるため、改善を行う必要がある。誤差の原因として3Dスキャナの測距精度が $\pm 40\text{mm}$ であること、また、方法2にて推定した回転角の誤差を含んでいることが挙げられる。方法2による装置の姿勢、原点位置の推定結果が含む誤差を減らすためには、精度のより良いスキャナを用い、既設部の形状計測結果に基づく装置の姿勢推定を行うこと、装置の姿勢推定に傾斜計を組み合わせる等の対応が考えられる。

また、計測1、2回目の装置の姿勢、原点位置は同じであったが、装置の姿勢、原点位置の推定結果が異なるのは、3Dスキャナの測距精度が $\pm 40\text{mm}$ であり、1、2回目の3Dスキャナの計測結果が異なることに起因する。

#### 4.5 照射された画像の誤差

図-15より方法1、2で作成した画像と真の掘削面との誤差  $L$  は、それぞれ $\pm 50\text{mm}$ 、 $\pm 80\text{mm}$ 以内であった。仮に余掘りの管理値を50mmに設定した場合、これらの誤差は無視できない値であり、改善を行う必要がある。方法1に比べ方法2の誤差  $L$  が大きいのは、推定した姿勢や原点位置の誤差の影響であると考えられる。さらに、方法1、2の誤差  $L$  は、3Dスキャナの測距精度が $\pm 40\text{mm}$ であること、また、3Dスキャナのレーザー光の進む方向と掘削面のなす角度が比較的小さく、凹凸がある箇所の計測が正確に行われないことが影響を受けていると考えられる。これについては、スキャナの測距精度の向上や、計測箇所に正対するようにスキャナを設置するなどの工夫により誤差の減少が図れると考えられる。



## 5. おわりに

三次元レーザースキャナ(3D スキャナ)とプロジェクションマッピングを組み合わせた計測表示システム“SP-MAPS®”を開発し、掘削面の施工管理の省人化、省力化、安全性の向上の観点から、山岳トンネルのインバート工の掘削箇所にてシステムの実証試験を行った。実証試験では、3D スキャナとプロジェクタが一体となった形状計測・照射装置(装置)の姿勢、原点位置を2種類の方法で推定した。1つ目は、トータルステーション(TS)とプリズムを用いる一般的な方法(方法1)である。2つ目は、本システムの構築のために考案した、トンネルの形状データの点群と座標値が既知の半球ドーム状マーカーを用いる方法(方法2)である。

実証試験の結果、以下が明らかとなった。

- 1)画像の視認性に関しては、装置から掘削面までの距離が約10mの場合、作業箇所の照度を変更せずに、5000lmのプロジェクタを用いて、茶色や黒色の掘削箇所に画像を照射した場合でも画像の色を明瞭に識別でき、山岳トンネルでの本システムの適用性を確認した。
- 2)照射の領域に関しては、装置から掘削面までの距離が約10mの場合、画像が照射される領域の幅が約4m、奥行きが約8mであり、掘削領域全体を照射することができなかった。これを解決するためには、照度を大きいプロジェクタを導入し、装置と掘削面までの距離を大きくする、また、作業空間に余裕がない場合は魚眼レンズのような広角レンズを使用して照射範囲を広げる等の対策が考えられる。
- 3)作業時間に関しては、方法1、2における3D スキャナの計測前の準備には、ともに約15分の時間を要した。方法1、2ともに3D スキャナによる形状計測からプロジェクタによる画像の照射までの時間は約1分であった。従来の検尺方法では作業に1時間以上時間を要していたが、SP-MAPS®では方法1、2ともに20分以下で作業が実施でき、従来の掘削管理の方法に対し、省力化に貢献することを確認した。また、装置の盛替えから画像の照射まで、方法1は約10分要するのに対し、方法2はマーカーの表面の点群が取得できていれば約1分で画像の照射を行えることから、装置の姿勢の変化や盛替えを行う機会が多いトンネルの掘削作業では、方法2の方が作業時間の短縮の面で優れていることを確認した。

4)省人化、安全性の向上に関しては、本システムの掘削以外の作業を、掘削箇所に立ち入らずに1人で実施でき、従来の掘削管理の方法に対し有効性を確認した。

- 5)装置の姿勢、原点位置の推定に関しては、本実証試験では方法1の推定結果を真値と仮定し、方法1に対し方法2の推定結果の誤差は最大で $0.51^\circ$ 、 $60.1\text{mm}$ であった。原点位置の推定結果の誤差は6)で後述する照射された画像の誤差に影響を与えるため、改善を行う必要がある。方法2による装置の姿勢、原点位置の推定結果が含む誤差を減らすためには、より精度の良いスキャナを用い、既設部の形状計測結果に基づく装置の姿勢推定を行うこと、装置の姿勢推定に傾斜計を組み合わせる等の対応が考えられる。
- 6)照射された画像の誤差に関しては、実際に画像が照射された箇所をTSのノンプリズム方式で測量し評価した。照射された画像の誤差は方法1、2でそれぞれ $\pm 50\text{mm}$ 、 $\pm 80\text{mm}$ であった。仮に余掘りの管理値を50mmに設定した場合、これらの誤差は無視できない値であり、改善を行う必要がある。これらの誤差はスキャナの測距精度の向上、スキャナと計測箇所が正対するようにスキャナを設置することにより減少すると考えられる。

今後は実際のトンネル掘削管理業務への展開のために、方法2の装置の姿勢、原点位置推定の精度、照射の精度の向上の検討と、3D スキャナに依存する計測誤差を考慮した本システムの運用方法の検討を行うと同時に、本システムの他の用途への応用についても検討を行う予定である。

### <参考文献>

- 1) 畠田 篤志, 手塚 康成, 近藤 啓二, 黒沼 出: 3D レーザースキャナと画像処理技術を用いた変位計測システムの開発, 第43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.199-203, 2015.
- 2) 青野 泰久, 竹内 啓五, 中谷 篤史: 3D スキャナとプロジェクションマッピングを組み合わせたトンネルの掘削管理に関する基礎的研究, 土木学会全国大会第71 回年次学術講演会, pp.1793-1794, 2016.

