

# 10. 画像処理を利用したトンネル断面計測システムの開発

(株)奥村組；寺田 道直・\*市原 義久

## 1. まえがき

近年、山岳トンネル工事は関連技術の進歩にともない、技術的あるいは経済的に厳しい管理が要求される状況にある。工事を進めるうえで、その合理性を追求するためには、余掘り・余巻きの低減は最も大きな課題である。余掘り・余巻きが生じる直接の原因は削孔機械などのハードな技術に大きく依存するが、掘削断面計測などのソフトな技術によってもその低減を図ることができる。すなわち、掘削断面の形状を速やかに計測し、設計断面との相違を定量的に把握して次断面の削孔パターンに反映させることにより、間接的に余掘り・余巻きを低減させることができる。また、このようなフィードバックサイクルをまわすことにより、掘削管理の高度化を図ることができる。

今回、画像処理技術を利用したトンネル断面計測システムを開発した。本稿ではシステムの概要について説明するとともに現場計測への適用について述べる。

## 2. 基本原理

### (1) 計測原理

トンネル断面に収束性のよい光線を回転照射し、この光の軌跡を含む断面全体の画像を撮像する。この画像中から計測断面の輪郭線を画像処理により抽出するとともにその位置情報を求め、輪郭線と計画断面を比較することにより、掘削管理に必要な諸量（余掘り・余巻きの位置・量など）を計算する。

なお、座標値を計算するためには画像データの縮尺比が必要であり、その準備として、計測断面内に較正ポイントとして2点に対して光線を照射しその画像を撮像するとともに、その2点間の距離を計測する。この2点の対応画素および距離から、個々の画素の較正長を算出する。

### (2) 画像計測の特長

従来のトンネル断面計測技術はおおむね以下の三つに分類できる。

- i. 切羽面に断面定規（設計断面を表示する枠）を設置して任意点の定規からのずれを直接測定する方法
- ii. 光波や超音波の測距儀により、トンネル壁面上の任意点までの距離を所定角度ごとに計測する方法
- iii. 前方交会法の原理にもとづいて2台のトランシットやステレオ写真の視差から対応点の位置座標を求める方法

これらの計測方法はいずれも点の計測技術であるので、共通する基本的問題点として、トンネ

ル断面全体の形状を正確に把握するためには多数の測定を行わなければならないので多大な労力と時間が必要なこと、離散的な測定値から連続した形状を推定せざるをえないので本来の高い計測精度が生かされていないことなどがあげられる。

本システムによる計測では連続した線の計測が可能であり、掘削断面全体の幾何学的形状や変形モードなど、より高度な技術情報を効率的に得ることができる。また、掘削断面形状、吹付け厚さ、2次覆工厚さなどの多目的の計測に使用できる以外に、曲線や特殊形状（縦長・偏平など）のトンネル、大断面の地下空洞などにも使用でき応用範囲が広い。

### 3. システム構成および計測手順

本計測システムは、トンネル工事の日常的な施工サイクルのなかで使用することを目指している。坑内で使用する画像計測機器と事務所などの室内で使用する画像処理装置の2つの要素に分離している。坑内の計測で得られる画像データを室内で解析して、その結果を出力する。このようなシステム構成にすることにより、坑内における使用機器を減少させ、坑内作業の簡素化あるいは作業時間の短縮を図っている。

#### (1) 坑内計測

坑内計測システムの機器構成を図-1に示す。光照射手段としては、He-Neレーザーをステッピングモータに取り付けたプリズムで回転照射する装置を使用する。撮像手段としては、画像データをアナログのフロッピーディスクに収録することができるスチルビデオカメラ（SVカメラ）を使用する。回転レーザーおよびSVカメラは測量用の三脚に取り付けるが、両者とも回転台、水平スライド台を組み合わせた取付治具を使用することにより、その操作性の向上を図っている（写真-1参照）。

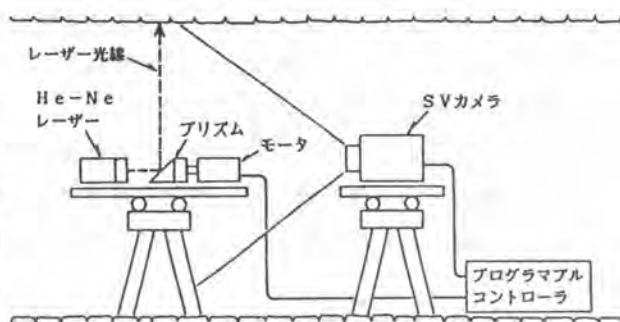


図-1 坑内計測システムの機器構成

坑内計測の手順を図-2に示す。計測準備として、計測対象断面の中心に回転レーザーを設置し、これより前方または後方のトンネル中心にSVカメラを設置する。SVカメラは、レーザー光線をトンネル軸方向に回転させ、それにあわせて設置する。次に、SVカメラにより以下の3種類の画像を撮像する。



写真-1 坑内計測システム

- i. 背景画像；レーザー光線を照射していない状態
- ii. 較正画像；較正ポイント（2点）および中心点
- iii. 計測画像；レーザー光線の軌跡（輪郭線）

計測画像の撮像方法としては、輪郭線を円周方向に対して分割し撮像する。SVカメラはその機能上シャッター開放が不可能であり、露光時間は最長のもので1秒であり、この1秒の間にレーザー光線を全周方向に回転させた場合はそのエネルギーが分散されSN比がかなり低下し、輪郭線を画像処理により抽出するのが困難である。この対策として、レーザー光線を分割して回転させることによりSN比の向上を図っている。したがって、SVカメラのシャッターとレーザー光線の回転を連動させる必要があるが、これらの機器の一連の動作はプログラムブルコントローラに記憶しておき、簡単なボタン操作で制御することとした。

## (2) 室内解析

室内解析システムの機器構成を図-3に示す。坑内計測で得られる画像データをSV再生器により再生し、画像処理ボードによりA/D変換してパソコンに入力し解析を進める。本計測システムにおいて、1フレームの画像を構成する画素の数は水平方向および鉛直方向ともに512画素であり、各画素の輝度(明るさの度合い)は256階調で表現している。本計測システムの基本分解能はこの画素数に依存し、その幾何学的分解能は約0.2%となる。

室内解析の手順を図-4に示す。解析準備として、設計断面あるいは校正ポイント間の距離などの計測条件を入力し、坑内計測で得られる背景、校正、計測画像データをそれぞれ入力する。

図中の⑤輪郭線の画像処理では、画像の雑音除去、輪郭線の抽出、データ圧縮などを行う目的で、以下に示す幾つかの画像処理を行っている。

- i. 加算処理; 分割して撮像した計測画像を論理的の $\sigma$ で累積加算することにより全周方向に連続した輪郭線画像を得る
- ii. 減算処理; 計測画像と背景画像との輝度差を取ることで背景の雑音を消去してSN比の向上を図る

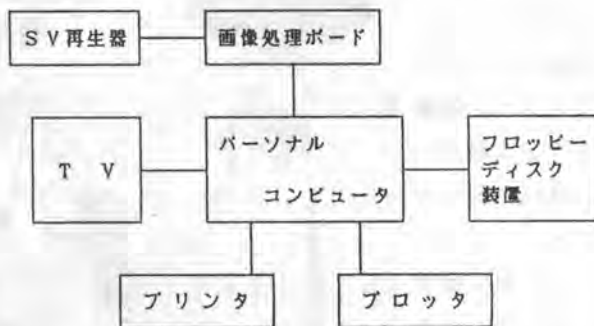


図-3 室内解析システムの機器構成



図-2 坑内計測フロー



図-4 室内解析フロー

- iii. 2値化処理；適当な輝度をしきい値として明るい部分（輪郭線）と暗いの部分に分ける
- iv. 膨張処理；掘削面の向きや凹凸により生じる輪郭線の微小な欠けを膨張させることにより連結する
- v. 縮退処理；輪郭線を図心方向に縮退させることにより細線化する
- vi. チェイン符号化処理；輪郭線をその出発点の座標とその延長方向を示す符号の組合せで曲線形状を表現することによりデータ量を圧縮する

⑥断面形状の解析では、輪郭線を構成する各画素の設計線との位置ずれ情報（極座標表現）を計算し、余掘り・当り面積などを求める。また、これらの解析結果は、⑦計測結果の出力/保存において、モニター画面、プロッタ、プリンタにより図化または印字出力するとともに、フロッピーディスク内に保存する。

#### 4. 現場計測への適用

本システムを高速道路トンネル（掘削幅約12m、高さ約8m）の上部半断面に適用した事例の計測結果を図-5に示す。この図より、円周方向に連続した線の計測結果が得られていることがわかる。

また、計測誤差としては0.3%程度であり、実用的には十分な計測精度が得られている。誤差の要因としてはレンズ収差の影響がある。本システムでは広角レンズを使用してできるだけ近距離で撮像するので、レンズ収差の影響が大きくなるが、これについてはコンピュータ上でソフト的に補正処理を行うことにより、ほぼ除去することができる。

なお、トンネル坑内における計測所要時間は、一断面当たり約15分である。

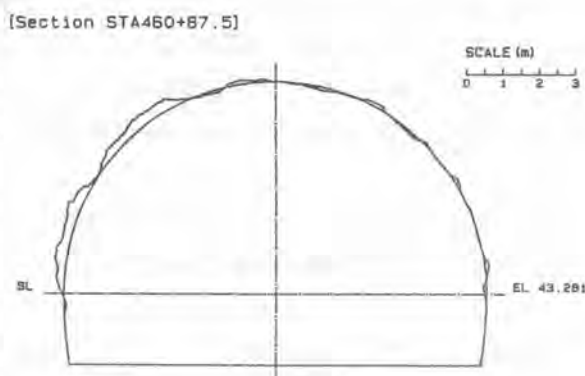


図-5 現場計測への適用事例

#### 5. あとがき

レーザー光線とSVカメラによる計測に画像処理技術を組み合わせた新しいトンネル断面計測システムを開発した。計測精度は十分に使用に耐えるものと考えられ、取扱いについても現場作業サイクルのなかで対応できると考えられるので、今後は更にトンネル工事現場へ適用することにより、システムの実用性の向上を図りたいと考える。

本計測システムでは連続した線の計測が可能であるので、従来の点の計測技術と比較して、より高度な技術情報を得ることができる。山岳トンネルの情報化施工技術は、力学的情報の計測管理に重点が置かれる傾向があるが、出来型情報を得る本技術が掘削管理の高度化や今後のロボット化を支援する要素技術の一つとして期待できるものとする。