

トンネル壁面連続撮影画像からの画像展開図作成に関する基礎研究

山口大学大学院 学生会員 ○松本潤児
(株) 三井住友建設 正会員 塩崎正人

山口大学大学院 正会員 河村 圭
山口大学大学院 正会員 中村秀明

1. はじめに

トンネル覆工コンクリートの点検は、近接目視かつ長時間の上向き苦渋作業であるとともに、その精度向上が問題となっている。さらに、点検成果物となる変状図作成は、手作業であり、点検業務の大きな負担となっている。このため、各種センサーおよび情報処理技術を利用した点検作業および成果物作成の効率化また定量化が期待されている。これらを背景として、近年、デジタルビデオカメラを用いた点検装置の開発が進んでいるが、既存装置は点検コストが高額かつ操作に高い専門性を要することから、十分な維持管理予算を確保できない地方自治体では、これらの点検装置は導入できない現状にある。

著者らは、点検装置の簡易化また低コスト化を目指し、一般的な車両に搭載可能な撮影装置の開発を進めている¹⁾。本研究では、この撮影装置にて得られた画像から、変状を抽出するための基礎図面となる撮影画像展開図作成の効率化を目的とし、撮影画像を自動的に連結する手法に関する基礎研究を行った。

2. 撮影画像展開図作成装置

2.1 撮影手法

本研究の撮影装置は、撮影画像展開図の作成を目的として、車両に複数台のカメラと照明を設置した。ここで、図-1には、撮影装置の設置図を示す。本図に示すように、装置下部よりV1からV5の5台のカメラおよび照明が設置されている。この撮影装置を設置した車両を用いて、走行中に動画の撮影を行うことで、各カメラは、連続したトンネル壁面の画像を撮影することができる。なお、撮影装置は、車両側面から車両上方までスライド可能である。この機能を用いてカメラ位置を徐々に上方に移し、走行を複数回繰り返すことにより、トンネル壁面全体の撮影を行う。また、表-1には、本研究で用いた撮影カメラの設定値を示す。

2.2 撮影画像展開図作成フロー

図-2には、図-1の撮影装置で撮影された画像から撮

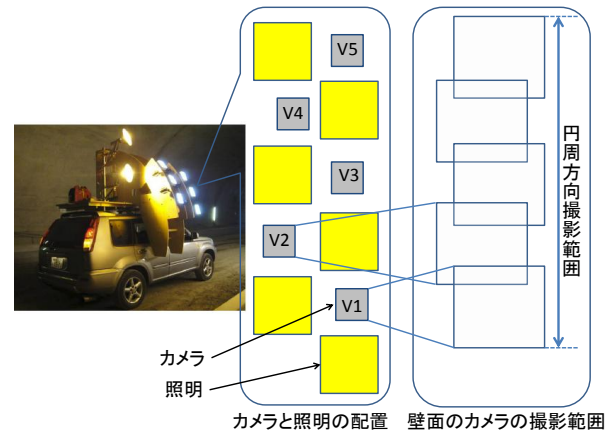


図-1 撮影装置の設置図

表-1 撮影カメラの設定値

項目	設定値
画像解像度(縦×横)	1080×1920 pixel
フレームレート	60 fps

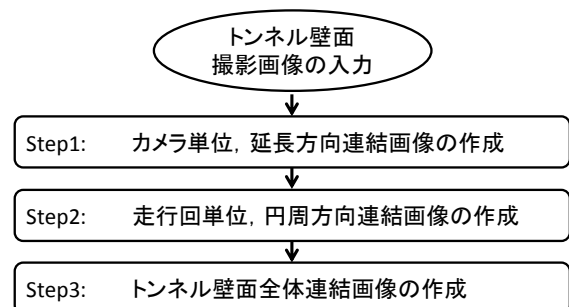


図-2 撮影画像展開図作成フロー

影画像展開図を作成するフローを示す。Step1では、1台のカメラによる撮影画像を延長方向に連結する。この連結画像は、1セントル(10.5m程度の施工単位)ごとに分割して作成する。Step2では、Step1で作成された連結画像をさらに走行回単位で円周方向に連結する。すなわち、Step1で作成した同一走行回のカメラ5台分の連結画像を円周方向に連結する。最後に、Step3では、Step2で作成された各走行回の連結画像を円周方向に連結し、トンネル壁面全体の撮影画像展開図を作成する。なお、本研究は、Step1の開発を対象とし

ており、詳細は、3章で述べる。

3. 延長方向画像連結手法

3.1 延長方向結合

図-3には、Step1の延長方向結合における、画像の結合処理のイメージ図を示す。本研究の延長方向画像連結手法では、カメラ底辺を走行方向(図-3のX軸正方向)に向けて撮影した画像を用いて連結を行う。具体的には、連続撮影された前後画像の前画像を画像1、後画像を画像2とすると、画像2を画像1に対してX軸方向またY軸方向に移動させ、重なり領域内の全画素間の類似度を求める。この類似度による評価で最も適切な重ね合わせ位置と判定された箇所が、本手法による2枚の前後画像間の結合位置となる。なお、画像2の移動は、事前設定された探索領域内において行う。

(1) 探索領域の設定

本結合処理における結合位置の探索領域は、図-3に示されるように、画像2の左上座標を (k, l) とすると、X軸方向およびY軸方向に対し、以下の式(1)の範囲内で事前に設定する。

$$0 \leq k < 1080, -1920 < l < 1920 \quad (1)$$

なお、結合位置の探索は、この探索領域内で、1pixelずつ画像2を移動させながら行われる。

(2) 類似度計算

本研究では、式(2)に示されるSSD(Sum of Squared Difference)を用いた。なお、本式では、2枚の画像は、前画像の左上を基点 $(0,0)$ として画像の座標を考える。ここで、図-3の例では、画像1の左上が基点となる。

$$R_{SSD} = \sum_{j=n}^N \sum_{i=m}^M (I_1(i, j) - I_2(i, j))^2 \quad (2)$$

ここで、 R_{SSD} は重なり領域の2枚の画像の画素値の差の2乗であり、値が小さいほど類似度が高いと判定する。 (i, j) は2枚の画像が重なった箇所の画像の (x, y) 座標を示し、 $I_1(i, j)$ また $I_2(i, j)$ は1枚目と2枚目の画像の座標ごとの画素値である。さらに、 m と n また M と N は、2枚の画像が重なった領域の左上座標 (m, n) および右下座標 (M, N) の座標である。

3.2 結合処理の高速化

上述の探索手法では、探索領域内において、画像2の移動量を1pixelとし、その都度、重なり領域内の全画素で類似度の計算を行う。この探索手法では結合位置の探索回数および類似度の計算量が膨大になり、処

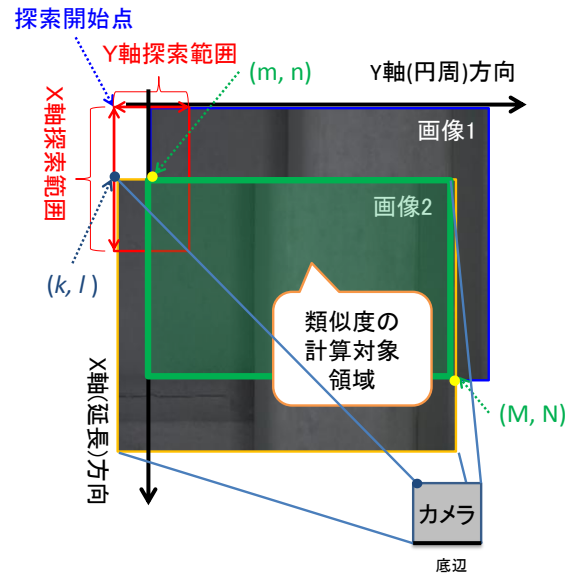


図-3 延長方向結合処理イメージ図

理時間が長くなる。このため、本研究では、結合処理の高速化を目的として、探索領域内の探索点のスキップ（探索を粗くする）および重なり領域内の類似度計算点のスキップ（類似度計算対象の画素数を限定する）を行うことで、処理時間を短縮した。さらに、本実験のトンネルでは、カメラ1本当たり、画像枚数が44,000枚程度と膨大なため、連結画像に影響を与えない程度の割合で画像を間引く処理を行った。

4. 実験

4.1 実験条件

(1) 撮影条件

表-2には、本研究で用いたトンネル壁面の撮影条件を示す。本研究で利用したトンネル壁面の実験データは、全長735mの同心円トンネルである。画素分解能を0.4mm/pixelとした場合、トンネルのピクセル長は1,837,500pixelとなる。本研究における対象トンネルの撮影は、表-2の条件より、往路6回、復路5回の計11回の撮影となった。また、カメラ5台で撮影を行ったことから、撮影ライン単位では55本となる。なお、撮影車両速度は、4.0km/h程度である。ここで、図-5には、各走行回の撮影位置関係図を示す。図-5中のO1からO6またR1からR5の撮影箇所は、それぞれ往路および復路の走行回に対応する。また、V1からV5は、搭載された各カメラ位置に対応する。なお、本実験対象のトンネルは、供用開始前であり、路面は未舗装の状態である。また、撮影は、一般車両と異なる

表-2 撮影条件

項目	条件値
トンネル長	735 m(1,837,500pixel)
画素分解能	0.4 mm / pixel
走行回数	11 回
車両走行速度	4.0 km / h 程度

走行方向で実施された。

(2) 画像連結条件

表-3 には、本実験で用いた、延長方向結合処理のパラメータ値を示す。なお、本表の設定値は、試行錯誤で決定した。本実験では、Y 軸探索範囲を 0 とし、探索方向を X 軸方向のみとした。これは、Y 軸方向の探索を考慮すると、処理時間が膨大になるためである。具体的には、結合位置探索の画素数のスキップ幅は、X 軸方向のみ 11pixel とした。さらに、類似度計算の画素数のスキップ幅は、Y 軸方向および X 軸方向に、それぞれ 4pixel また 11pixel とした。

4.2 実験結果

(1) 連結長による撮影および結合精度の検証

本実験では、画像間の移動量の累積から連結長を求め、撮影および結合精度を検証する。図-6 には、撮影箇所 R1 の各カメラ(V1 から V5)のピクセル数の累積結果を示す。ここで、縦軸また横軸は、それぞれ累積ピクセル数および画像間番号である。累積ピクセル数とは、画像間の移動ピクセル数の累積数である。画像間番号は、前後画像を 1 組とした連結番号である。

図-6 より、カメラ V4 の累積ピクセル数は、他のカメラの累積ピクセル数より少ない傾向が見られた。また、他の撮影箇所でも同様の傾向が見られたことから、本実験では、カメラ V4 は異常があったと判断される。これは、カメラを設置した際のネジの緩みや、連結処理において Y 軸(円周)方向探索範囲を 0 としており、Y 軸(円周)方向のずれを考慮していないことが影響していると考えられる。

続いて、図-7 には、各撮影箇所の累積ピクセル数からトンネル長を逆解析した結果のグラフを示す。グラフの縦軸および横軸は、推定トンネル長また撮影箇所を示す。なお、本図中の 700m から 750m の間の黒い点線は、実際のトンネル長(735m)を示す。本図より、

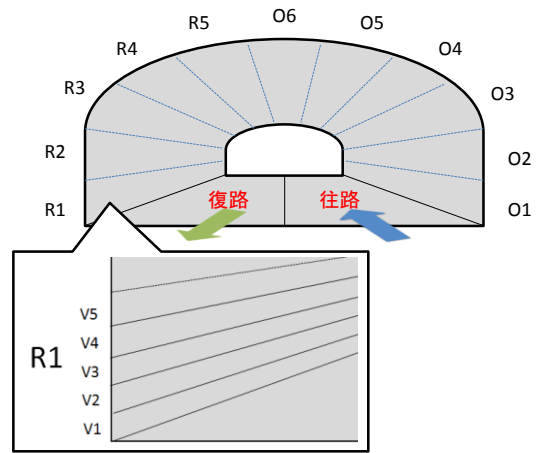


図-5 各走行回の撮影位置関係図

表-3 延長方向結合処理パラメータ値

パラメータ		数値
撮影画像の間引き数		3 枚
Y 軸(円周)探索範囲		-
X 軸(延長)探索範囲		0~540
結合位置 スキップ幅	Y 軸(円周)方向	-
	X 軸(延長)方向	11 pixel
類似度計算 スキップ幅	Y 軸(円周)方向	4 pixel
	X 軸(延長)方向	11 pixel

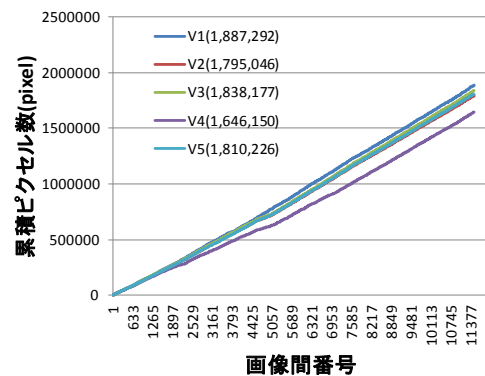


図-6 撮影箇所 R1 の各カメラの累積ピクセル数

分解能 0.4mm/pixel と仮定したとき、撮影箇所 O1 および R1 では、推定トンネル長が、おおよそ 735m となり、その他の撮影箇所では、700m 以下となった。このことから、撮影箇所 O1 および撮影箇所 R1 は、おおむね目標とした分解能 0.4mm/pixel で撮影されたことを示しており、その他の撮影箇所では、目標とした分解能よりも低い値で撮影されたことがわかる。この

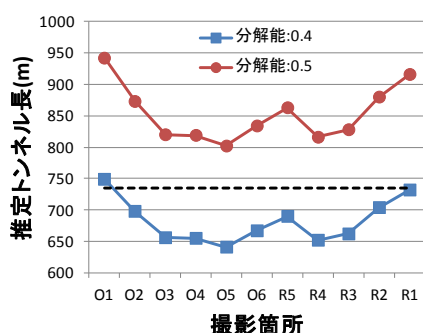


図-7 全撮影箇所の推定トンネル長

分解能の低下の原因は、路面が舗装されていないことから、わだち掘れにより、撮影車両およびトンネル壁面の撮影距離が離れたためであると考えられる。

(2) 各画像間の移動量結果による結合精度の検証

図-8 および図-9 には、それぞれ撮影箇所 R1 のカメラ V1 またカメラ V3 の画像移動量グラフ(画像間番号 1 から 100)を示す。ここで、縦軸また横軸は、それぞれ画像移動量および画像間番号を示す。これらの図より、図-8 の 75 組目付近など、周辺の移動量に比べスパイク状の極端な外れ値(結合ミス)は見られたが、カメラ V1 およびカメラ V3 とともに、なめらかに移動量が推移していることから、連結処理はおおむね正しく動作しているといえる。また、画像移動量を撮影車両速度に換算すると、100pixel が 2.2km/h、200pixel が 4.3km/h に相当することから、実際の撮影速度 4.0km/h に近い速度になり、この結果からも画像結合が良好に行えていることが分かる。

(3) 連結画像結果による結合精度の検証

図-10 には、撮影箇所 R1 の各カメラにおける連結画像(先頭 1 セントル分)を示す。本図より、カメラごとにみると、目視では結合ミスが判断できない程度の結合が行えている。一方で、5 台のカメラの連結画像を比較すると、図-10 の赤丸で囲んだ範囲に見られるように、本来は直線であるべき継ぎ目の位置が異なるなど、図-8 および図-9 で確認された、外れ値が結合に影響していることがわかる。

5. 結論

本研究では、撮影画像展開図作成における撮影画像の画像連結手法の提案を行った。実験結果より、カメラごとでは、目視で結合ミスが確認できない程度の精度で、連結画像を作成できた。しかし、課題として、

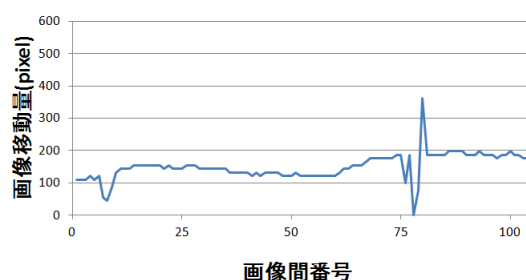


図-8 撮影箇所 R1 のカメラ V1 の画像移動量グラフ

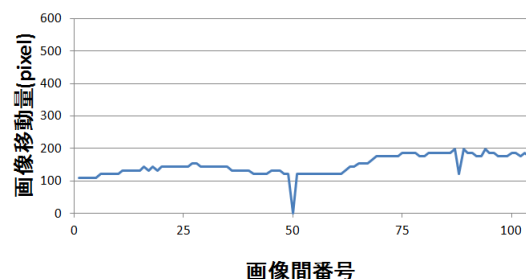


図-9 撮影箇所 R1 のカメラ V3 の画像移動量グラフ

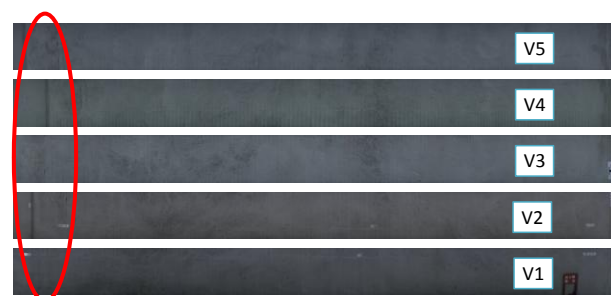


図-10 各カメラの連結画像(先頭 1 セントル分)

連結時における連結速度の改善および移動量の外れ値の補正などがある。

謝辞：本研究にご協力頂いた株式会社テクノフラッシュの車田茂美氏、菊池典明氏、本多健治氏、日立ソリューションズの漆谷哲也氏に心から感謝の意を示します。また、本研究は、JST 研究成果展開事業 A-STEP フィージビリティスタディ(シーズ顕在化タイプ)平成 25 年度採択課題 AS2511142H の一課題として実施したものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 塩崎正人, 掛橋孝夫, 加藤健一, 菊池典明, 河村圭: デジタルビデオカメラを用いた車載型計測に関する基礎実験, 第 67 回土木学会年次学術講演会, CS8-019, 2012.9