

(37) 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研究

河村 圭¹・松本 潤児²・塩崎 正人³・本多 健治⁴・中村 秀明⁵

¹正会員 山口大学大学院准教授 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: kay@yamaguchi-u.ac.jp

²学生会員 山口大学大学院 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: u050vn@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 三井住友建設株式会社 技術開発センター (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

E-mail: MasandoShiozaki@smcon.co.jp

⁴非会員 有限会社テクノフラッシュ (〒270-2265 千葉県松戸市常盤平陳屋前4-17)

E-mail: honda@tfcworld.co.jp

⁵正会員 山口大学大学院教授 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: nakahide@yamaguchi-u.ac.jp

トンネル覆工コンクリートのひび割れ点検作業は、上向きの近接目視調査を主体として実施されており、点検精度の人的誤差などの問題を抱えている。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の自動化が強く期待されている。これらを背景として、いくつかの点検装置が開発されているが、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ため、十分な維持管理予算を確保できない地方自治体などでは、これらの点検装置は利用されていないのが現状である。このため、地方自治体へのトンネル点検装置の導入を可能とするには、点検装置をより低コスト化また簡略化する必要がある。本研究では、特に、撮影装置から得られた撮影画像をもとに、画像処理技術を用いて、撮影画像展開図の作成を支援するソフトウェアの開発を行った。

Key Words : digital image processing , tunnel lining concrete , inspection

1. はじめに

トンネル覆工コンクリートの点検業務は、点検現場では、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、現場での点検実施後に、事務所内で行う変状図作成は、手作業であり、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および成果物作成の効率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¹⁾の開発が進んでいる。しかし、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。

これらを背景として、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²⁾。本研究では、この撮影装置にて得られた撮影画像を自動的に連結し、撮影画像展開図を作成する手法の研究を行った。なお、撮影画像展開図は、ひび割れなどの変状を抽出するための基礎図面となる。

2. 撮影画像展開図作成装置

(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、5台のカメラ(V1からV5)および照明が設置されている。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

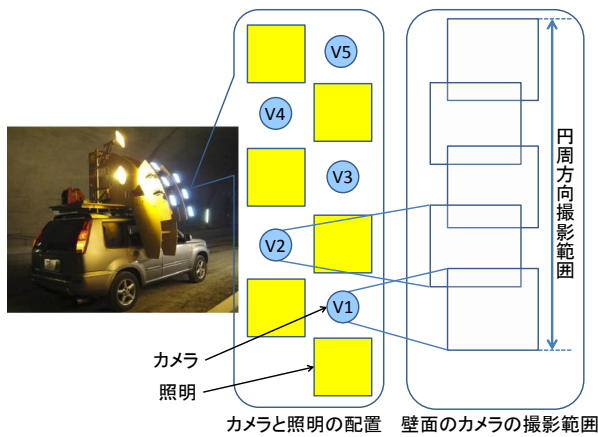


図-1 撮影装置の設置図

表-1 撮影カメラの設定値

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

徐々に上方に移動させ、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。表-1には、本研究で用いた撮影カメラの設定値を示す。

(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影画像展開図を作成するフローを示す。なお、事前準備として、上記の撮影装置より撮影された動画より、1枚ごとのキャプチャー画像を作成する。Step1では、1台のカメラによる撮影画像をトンネル延長方向に連結する。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

(1) 延長方向結合

図-3には、図-2のStep1におけるトンネル延長方向の画像結合処理のイメージ図を示す。なお、本手法は、カメラ底辺を走行方向（図-3のY軸の正方向）に向けて撮影した画像を用いることを前提とする。具体的な結合手法は、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。この類似度が最小となる箇所が、本手法による

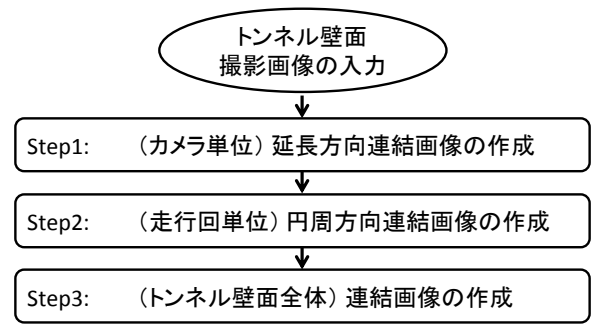


図-2 撮影画像展開図作成フロー

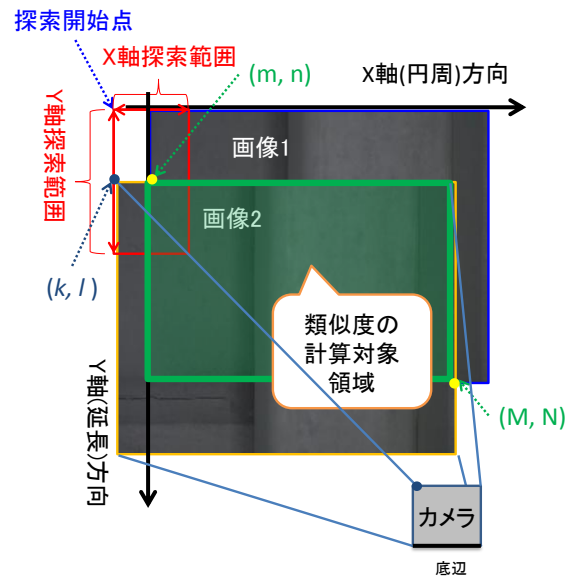


図-3 トンネル延長方向結合処理イメージ図

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。

a) 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、結合位置の探索は、X軸方向およびY軸方向に対し、式(1)の範囲内とした。

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

b) 類似度計算

本研究での類似度計算は、式(2)に示されるSSD³⁾ (Sum of Squared Difference) を用いた。なお、本式では、2枚の画像は、前画像の左上座標を基点 $(0, 0)$ として考える。なお、図-3の例では、画像1の左上が基点となる。

$$S = \frac{\sum_{i=m}^M \sum_{j=n}^N (I_1(i, j) - I_2(i, j))^2}{(N - n + 1) \times (M - m + 1)} \quad (2)$$

ここで、S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およびMとNは、2枚の画像が重なった領域の左上座標 (m, n) また右下座標 (M, N) である。式(2)の分子のみでは、結合の探索位置に

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

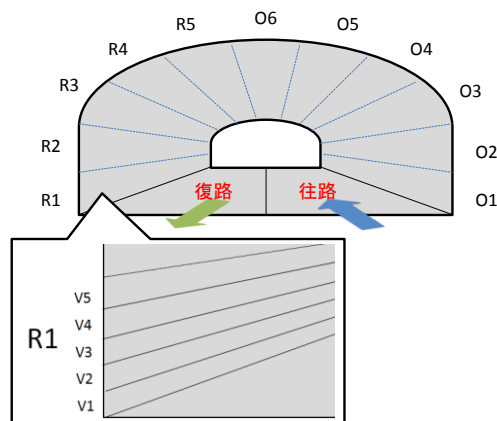


図-4 各走行回の撮影位置関係図

より、類似度計算の対象となる画素総数が異なる。このため式(2)の分母により、結合の探索位置の違いによる計算対象画素数の差を補正した。

(2) 結合処理の高速化

2枚の画像の結合位置の探索手法を高精度で行う場合には、探索領域内で、1pixelずつ画像2を移動させ、さらにその都度、重なり領域内の全画素で類似度を計算する必要がある。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、撮影画像枚数が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いた。

4. 実験

(1) 実験条件

a) 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は、全長 735m の単心円トンネルである。また、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。

表-3 トンネル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
X軸(円周)探索範囲		-
Y軸(延長)探索範囲		0~540
結合位置 スキップ間隔	X軸(円周)方向	-
	Y軸(延長)方向	11 pixel
類似度計算 スキップ間隔	X軸(円周)方向	4 pixel
	Y軸(延長)方向	11 pixel

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-4 には、各走行回の撮影位置関係図を示す。図-4 中の O1 から O6 および R1 から R5 の撮影箇所は、それぞれ往路また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、一般車両と異なる走行方向で実施された。

b) 画像連結条件

表-3 には、本実験で用いた、トンネル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。また、本実験では、X 軸（円周）探索範囲を 0 とし、画像結合の探索方向を Y 軸（トンネル延長）方向のみとした。これは、X 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。

(2) 実験結果

a) 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した。図-5 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、縦軸および横軸は、それぞれ累積ピクセル数また画像間組番号である。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。また、画像間組番号は、前後画像を 1 組とした連結組番号である。図-5 の結果より、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、他の撮影箇所の連結結果において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 X 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-6 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を示す。なお、本図は、撮影装置中央のカメラ（V3）の結果である。ここで、グラフの縦軸および横軸は、それぞれ推定トンネル長ま

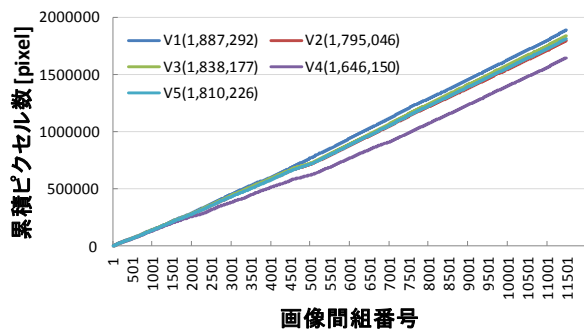


図-5 撮影箇所R1の各カメラの累積ピクセル数

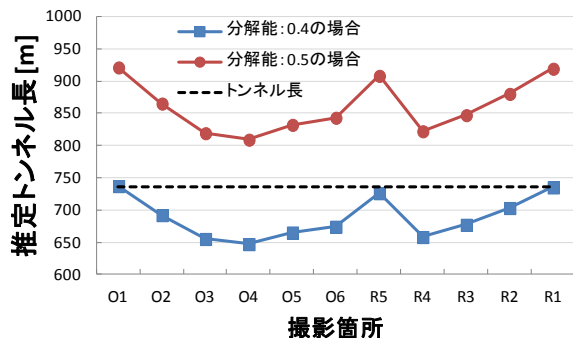


図-6 全撮影箇所の推定トンネル長

た撮影箇所を示す。また、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、分解能を 0.4mm/pixel と仮定した場合（図中の青線）では、撮影箇所 O1 および R1 の推定トンネル長は、おおそ 735m となり、その他の撮影箇所では、700m 以下となった。この結果、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。

b) 各画像間の移動量結果による結合精度の検証

図-7には、撮影箇所R1のカメラV1およびV3の画像移動量グラフ（画像間組番号1から100）を示す。ここで、縦軸および横軸は、それぞれ画像移動量また画像間組番号を示す。本図より、カメラV1およびカメラV3ともに、なめらかに移動量が推移しており、連結処理はおおむね正しく動作している。しかし、カメラV1の75組目付近に見られるようなスパイク状の極端な外れ値が存在するなど、各カメラにおいて結合ミスの個所が散見された。

c) 連結画像結果による結合精度の検証

図-8には、撮影箇所 R1 の各カメラにおける連結画像（先頭1センチメートル分）を示す。なお、図-5に示されるように各カメラの画像連結長が異なったことから、本連結画像の作成には、トンネル長に最も近い値を示したカメ

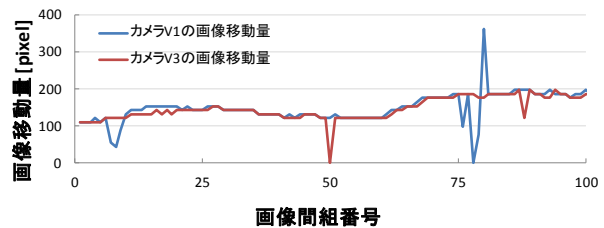


図-7 撮影箇所R1のカメラV1およびV3の画像移動量グラフ

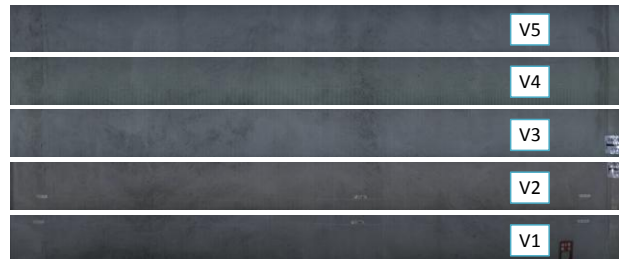


図-8 各カメラの連結画像（先頭1センチメートル分）

ラ V3 の結果（結合座標）を用いた。各カメラのトンネル延長方向の連結画像を見ると、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。また、各カメラの連結画像を比較すると、多少の円周方向での画像のズレは見られるが、おおむね良好に連結を行っている。

5. おわりに

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、目視では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、今後さらに精度を高めるには、移動量の外れ値の補正などが課題である。

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、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) 後藤和夫，篠原秀明，下澤正道，堀内宏信：デジタル画像を用いたトンネルの変状調査・管理支援システムの開発，地下空間シンポジウム論文・報告集 Vol.12, pp.189-194, 2006.
- 2) 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.
- 3) 梅田 和昇：画像処理の基礎，精密工学会誌 Vol. 72 (2006) No.5, 2009.