

(48) 画像処理技術を用いたトンネル壁面画像展開図作成における結合精度向上に関する研究

河村 圭¹・古賀 通博²・松本 潤児³・塩崎 正人⁴・澤村 修司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: v015vn@yamaguchi-u.ac.jp

³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

⁴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

⁵正会員 山口県宇部土木建築事務所 工務第二課二班 (〒755-0033 山口県宇部市琴芝町1-1-50)
E-mail: sawamura.shiyuujii@pref.yamaguchi.lg.jp

トンネル覆工コンクリートのひび割れ点検作業は、点検員による上向きの近接目視調査を主体として実施されており、長時間の交通規制や点検精度の人的誤差などの問題を抱えている。このため、現場での点検作業の自動化による点検業務の効率化およびトンネル検査データの定量化が強く期待されている。これらを背景として、著者らは、デジタルビデオカメラを用いた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ている。本研究では、特に、画像連結の精度の向上を目的として、本ソフトウェアによるトンネル延長方向の結合位置探索の際に発生する、結合エラーの補正に関する研究を行った。

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

1. はじめに

点検員によるトンネルの目視点検は、暗い坑内環境による人的誤差および長時間の交通規制という問題を有する。このため、著者らは、トンネル点検作業の効率化、また高精度化を目的として、撮影車両より取得されたコンクリート壁面の連続撮影画像より、トンネル壁面画像展開図を自動で作成するソフトウェアの研究・開発を進めている¹⁾。しかし、本ソフトウェアは、画像結合時の結合エラーの発生が問題となっていた。本研究では、特に、トンネル延長方向の自動画像結合における結合エラーの補正手法を提案する。

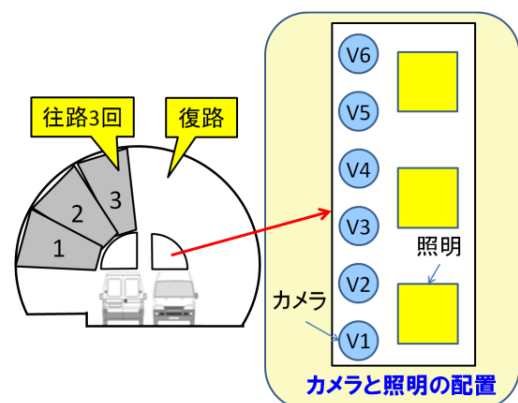


図-1 撮影装置

図-1 には、撮影装置を示す。本図に示されるように、本撮影装置には3台の照明と6台のデジタルビデオカメラがあり、これらは、トンネル円周方向に対して、それぞれ一列で設置されている。6台のカメラは、下部からV1, V2, V3, V4, V5, および V6 とする。また、本撮影装置では、1回の走行で撮影可能な範囲が限られてい

2. トンネル壁面画像展開図作成

(1) トンネル壁面の撮影

本節では、トンネル壁面の撮影手法について説明する。

る。このため、本研究の撮影では、撮影装置を車両側面から車両上方までスライドさせ、トンネル内を複数回走行することで、トンネル全体を撮影した。なお、本実験では、往路の3か所を対象とした。

(2) トンネル壁面画像展開図作成

本節では、トンネル壁面画像展開図作成の流れについて説明する。図-2には、トンネル壁面画像展開図作成の流れを示す。まず、本撮影装置により得られた各カメラの撮影動画をキャプチャし、カメラごとでキャプチャされた連続撮影画像をトンネル延長方向へ連結する。次に、カメラごとの連結画像をトンネル円周方向へ結合し、撮影箇所ごとの連結画像を作成する。最後に、撮影箇所ごとの連結画像をさらにトンネル円周方向へ結合し、トンネル壁面画像展開図を作成する。なお、本実験で用いたキャプチャ画像のサイズは、1920×1080pixelである。

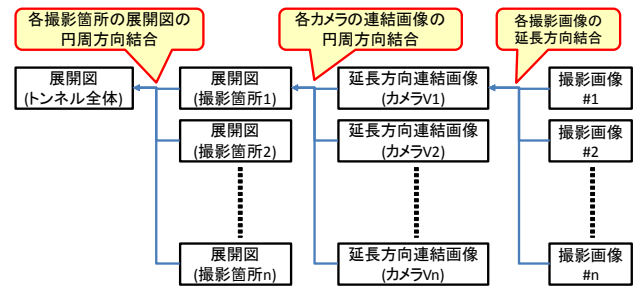


図-2 トンネル壁面画像展開図作成の流れ

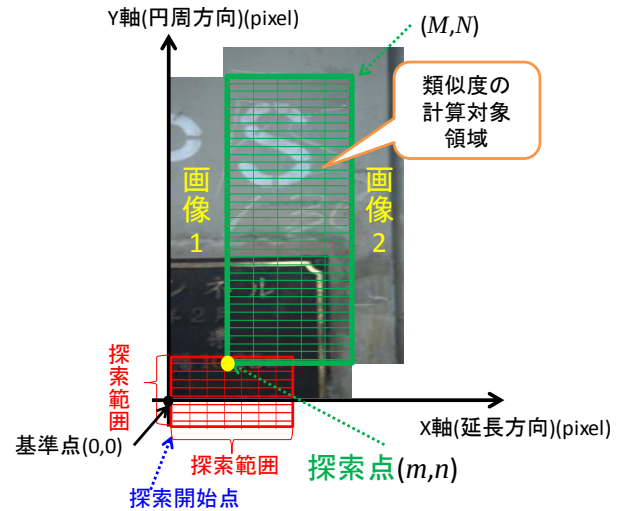


図-3 延長方向結合位置探索処理

(3) 延長方向結合位置探索

ここでは、延長方向自動画像結合の手法について説明する。カメラごとのトンネル延長方向の自動画像結合処理では、車両走行方向に撮影して得られたキャプチャ画像に対して、連続する前後画像ごとに類似度を計算し、結合位置探索を行う。この結果をもとに前後画像の結合を行う。図-3には、延長方向結合位置探索のイメージ図を示す。図中のX軸(pixel)およびY軸(pixel)は、それぞれトンネル延長方向またトンネル円周方向を示す。また、画像1および画像2は、それぞれ連続撮影キャプチャ画像の前画像また後画像であり、画像1の左下座標を基準点(0,0)とする。さらに、本図中の画像2の左下の点は、図中に示される探索範囲内での探索点を示す。一方で、類似度の計算対象範囲は、前後画像の重なり領域とし、類似度をSSD(Sum of Squared Difference)を用いて求める¹⁾。式(1)には、SSDを利用した類似度の算出式を示す。ここで類似度とは、前後画像の重なり領域がどの程度類似しているかを定量化するものであり、式(1)の値が小さいほど類似度が高いと判断する。

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

ここで、式(1)中の分子は、2枚の画像の重なり部における画像間の画素値の差の2乗であり、Sの値が小さいほど重なり部の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、I₁(i, j)およびI₂(i, j)は、それぞれ画像1また画像2の座標(i, j)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部分の左下座標(m, n)また右上座標(M, N)である。ここで、(m, n)は、図3中の探索範囲内、任意の値をとる探索点である。なお、式(1)の分子のみでは、

結合探索位置により、類似度計算の対象となる総画素数が異なる。このため、式(1)の分子を重なり部の面積(画素数)で割ることにより、結合の探索位置の違いによる類似度計算の対象画素数の異なりの差を補正した。

表-1には、延長方向結合位置探索におけるパラメータ値を示す。探索範囲内において、画像2を移動させる際の結合位置スキップ幅は、X軸方向を11pixelと設定し、Y軸方向を4pixelと設定したことから、1組の前後画像に対する結合位置の探索点総数は、81,911点から1,924点となった。この結合位置スキップ幅の設定は、延長方向結合位置探索の高速化を目的としている。

3. 補正手法

2(3)の延長方向結合位置探索処理では、キャプチャ画像に大きな特徴がない場合、結合位置の誤検出が発生する場合がある。このため、本研究では、以下の2つのSTEPから構成される結合位置の補正手法を提案した。なお、本補正手法は、延長方向移動量のみに対して実施し、円周方向移動量は0に固定した。この理由は、表-1のパラメータを用いた結合位置探索結果において、トンネル円周方向の画像移動量が数ピクセル程度であったこ

表-1 延長方向結合位置探索におけるパラメータ値

パラメータ		数値
延長方向探索領域	Xleft	0pixel
	Xright	810pixel
円周方向探索領域	Ytop	-50pixel
	Ybottom	50pixel
X軸方向結合位置スキップ幅		11pixel
Y軸方向結合位置スキップ幅		4pixel
X軸方向類似度計算スキップ幅		11pixel
Y軸方向類似度計算スキップ幅		4pixel

表-2 STEP1で用いた実験パラメータ

パラメータ	数値
撮影車両の速度(x)	8,333mm/s
フレームレート(y)	60fps
画素分解能(z)	0.23mm/pixel
画像移動量の推定値(S ₁)	600pixel
しきい値(T ₁)	200pixel

とから、画像結合にはトンネル円周方向の移動量は大きく影響しないと判断したためである。

STEP1：1次補正として、撮影装置また車両速度の情報より、画像の移動しうる範囲（実際の車両走行速度と推定される範囲）、すなわち車両移動範囲を推定し、その範囲外の移動量を本STEPにおける補正対象として補正する。具体的には、式(2)および式(3)に従って、延長方向画像移動量(図-3における探索開始点から結合位置までの延長方向の移動距離)を補正する。

$$M_{1i} = \begin{cases} m_i & \text{if } |S_1 - m_i| \leq T_1 \\ M_{1(i-1)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_1 = \frac{x}{y \times z} \quad (3)$$

ここで、式(2)中の M_{1i} は STEP1 終了時の画像移動量(pixel)、 i は注目画像間組番号、 m_i は 1 次補正前の画像移動量(pixel)、 T_1 はしきい値を示す。また、式(3)中の S_1 (pixel)は画像移動量の推定値であり、 x 、 y 、および z は、それぞれ撮影車両の想定速度(mm/s)、画像のフレームレート(fps)、また撮影時の設定分解能(mm/pixel)である。

なお、表-2 には、本 STEP におけるパラメータ値を示す。表中の x は、撮影車両の速度 30(km/h)を秒速に変換した値である。また、しきい値(T_1)の値は、撮影車両速度 10km/h に相当する画像移動量である。このしきい値を利用した理由は、撮影時には車両速度を一定にすることを意識したことから、撮影車両速度に ± 10 km/h 以上の変化はないと判断したためである。

STEP2：前述の結合位置探索処理では、周辺の画像間組番号の画像移動量と比較して、画像移動量が極端に

表-3 STEP2で用いた実験パラメータ

	フィルタサイズ($2k+1$)	しきい値(T_2)
1 回目	201	50pixel
2 回目	41	10pixel

変動する箇所が局所的に存在する。撮影車両は定速を意識して走行していることから、局所的に大きく画像移動量が変動することはない。そのため、2 次補正として、式(4)および式(5)に従って延長方向画像移動量を補正する。

$$M_{2i} = \begin{cases} M_{1i} & \text{if } |S_{2i} - M_{1i}| \leq T_2 \\ S_{2i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$S_{2i} = \text{med}(M_{1(i-k)}, \dots, M_{1i}, \dots, M_{1(i+k)}) \quad (5)$$

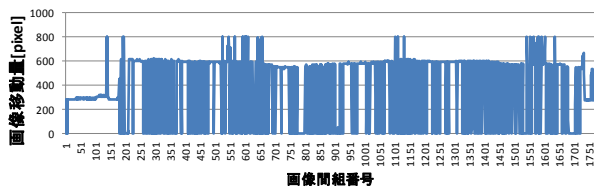
ここで、式(4)中の M_{2i} はSTEP2終了時の画像移動量(pixel)、 M_{1i} はSTEP1終了時の画像移動量(pixel)、 S_{2i} は式(5)より求まる中央値(pixel)、 T_2 はしきい値を示す。また、式(5)は移動メディアンであり、 $2k+1$ (k は整数)のフィルタサイズで中央値を求める。なお、STEP2は、複数回実施可能であり、本実験では本STEPを2回実施した。

なお、表-3には、本STEPにおけるパラメータ値を示す。1回目では、フィルタサイズおよびしきい値をやや大きめに設定し、周辺の画像移動量と比較して大きく画像移動量が変動した箇所を補正することを目的とした。一方で、2回目では、パラメータ値（フィルタサイズおよびしきい値）を小さくし、1回目より局所的な箇所かつ小さな移動量変動の結合エラーの補正を目的とした。なお、フィルタサイズおよびしきい値の値は、試行錯誤で判断した。

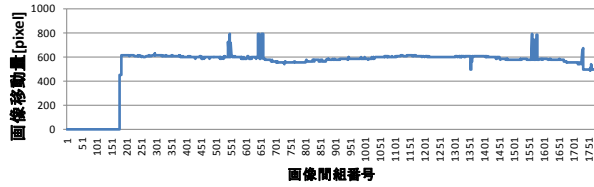
4. 実験結果

(1) 延長方向画像移動量

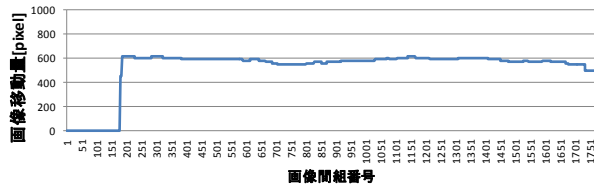
図-4には、撮影箇所1のV1における補正実施前および各補正実施後のトンネル延長方向画像移動量グラフを示す。本グラフの横軸は、結合処理を行う前後画像を1組とした組番号である。一方で、縦軸は、前後画像間において、前画像に対して、後画像がトンネル延長方向へ移動した距離(pixel)である。本結果より、補正実施前では、結合エラーの割合が高く、すべての撮影箇所またカメラの多くで5割程度となっている。そのため、適切な画像結合を行うことができないが、適切な画像移動量と思われる推移が、画像移動量600pixel周辺に、かろうじて確認できる状況である。1次補正実施後は、画像間組番号176以降において、グラフの波形が画像移動量600pixel前後を推移しているが、一部で明らかな結合エラー部が見られる。2次補正実施後は、グラフの波形がなめらかに



(a) 補正実施前の結果



(b) 1次補正実施後の結果



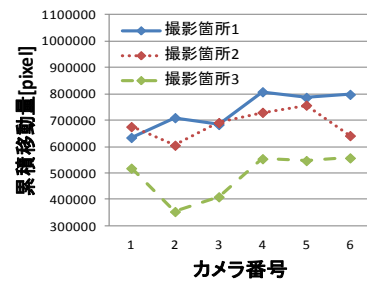
(c) 2次補正実施後の結果

図-4 画像移動量グラフ(撮影箇所1-V1)

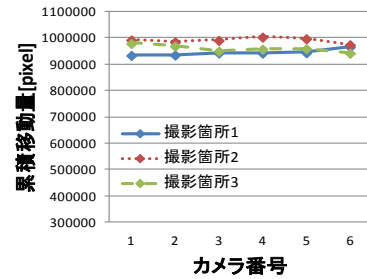
推移するように補正された。また、他の撮影箇所またカメラの画像移動量グラフにおいても、各補正におけるグラフの波形の変化の傾向はほぼ同様のものとなった。なお、図-4(b)および図-4(c)では、画像間組番号0から170付近までの画像移動量が0となっているが、これはトンネル外部が撮影された箇所であるため、展開図作成の結合精度には影響しない。

(2) 延長方向累積移動量

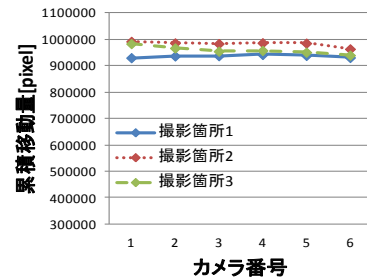
図-5には、補正実施前および各補正実施後の各撮影箇所またカメラごとの延長方向累積移動量グラフを示す。本グラフの横軸のカメラ番号は、図-1における撮影装置のカメラV1からV6に対応している。一方で、縦軸は、1台のカメラに対する前後画像移動量のトンネル延長方向累積移動量を示す。ここで、累積移動量とは、図-4における画像間組番号0から1771までの画像移動量を全て足し合わせた値であるため、異なる撮影箇所またカメラで大きく変動することはない。本結果より、撮影箇所単位で、カメラごとでの累積移動量の最長と最短の差を比較した場合、撮影箇所3が最も大きく、補正実施前は200,000pixel以上であったが、2次補正実施後は50,000pixel程度まで小さくなった。この累積移動量の差を画像1枚当たりに換算すると、115pixelから25pixelまで小さくなっている。また、他の撮影箇所でも同様の傾向が見られ、撮影箇所ごとの差も小さくなったことから、結合精度の向上が確認できた。なお、1次補正後と2次補正後の延長方向累積移動量グラフには、カメラごとでの累積移動量の最長と最短の差に大きな違いは見られなかった。



(a) 補正実施前の結果



(b) 1次補正実施後の結果



(c) 2次補正実施後の結果

図-5 各撮影箇所またカメラの累積移動量グラフ

5. おわりに

本研究で提案した補正手法を実施することにより、本実験では全ての撮影箇所またカメラの画像で、トンネル延長方向の自動画像結合における結合ミスが改善された。今後は、さまざまなトンネル壁面の画像に対して本補正手法を実施し、本手法の汎用性を検証することが必要である。

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、菊地典明氏、本多健治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採択課題 AS2511142H の一課題として実施したものである。

参考文献

- 1) 河村圭, 松本潤児, 塩崎正人, 本多健治, 中村秀明: 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, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol.39, pp.131-134, 2014.