

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手法

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.shiyuuji@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等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、トンネル壁面画像展開図の作成を支援するソフトウェアの開発を進めている。本研究では、特に、画像結合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

現在のトンネル覆工コンクリートのひび割れ点検作業は、点検員によるトンネルの上向きの近接目視点検が主体であることから、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。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、作業員の大きな負担となっている。このため、各種センサーや情報処理技術を利用したトンネル点検作業の効率化また高精度化が強く期待されている。これらを背景として、専用車両を用いたトンネル壁面の走行型計測システムの開発が進んでおり¹⁾²⁾、走行速度 70km/hでの画像計測およびレーザ計測等により、その撮影画像から幅 0.3mmのひび割れを認識可能とする計測車両が開発されている³⁾。しかし、既存の点検装置は点検コストが高額かつその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、これらの装置を利用することが困難な現状にある。以上の

ことから、点検装置の簡易化および低コスト化により、地方自治体が装置を安価に購入でき、職員自身で容易に操作できる点検装置の開発が必要である。そこで、著者らは、一般的な車両に搭載した撮影装置により取得されたコンクリート壁面の連続撮影画像より、撮影画像内の特徴を利用し、トンネル壁面画像展開図を自動で作成する画像結合手法およびソフトウェアの研究を進めている⁴⁾⁵⁾。なお、トンネル壁面画像展開図は、トンネル壁面のひび割れ等の変状を抽出するための基礎図面となる。

車両に搭載されたデジタルビデオカメラ等を利用し走行しながら撮影されたコンクリート壁面の撮影画像の連結に関する既存の技術としては、計測検査株式会社の特許 3276621号(トンネルの内部壁面のひび割れ検出方法)が挙げられる。本特許では、デジタルビデオカメラ等で撮影された連続画像のトンネル延長方向の結合に対して、走行位置、撮影車両の速度、カメラのフレームレート、および、間引く画像枚数から、画像間の重なり領域を決定し、連続画像をつなぎ合わせる手法を提案している⁶⁾。

しかしながら、本特許では、撮影画像内の特徴を利用した画像間結合の自動化に関する手法は提案されていない。

既存の画像内の特徴を利用した画像間の自動結合手法は、特徴ベースマッチング手法および領域ベースマッチング手法に分類される。特徴ベースマッチング手法は、結合しようとする画像からコーナー等の特徴点を検出し、この特徴点周辺の局所領域に対して特徴量を求め、これを画像間で比較することにより画像結合を行う。一方で、領域ベースマッチング手法は、画像間の重なり領域の類似度を比較することにより画像結合を行う。これらの手法のうち、本研究では、領域ベースマッチング手法を画像結合手法に利用している。なお、領域ベースマッチング手法では、画像間の重なり領域の類似度を評価する特徴量として、SAD(Sum of Absolute Differences)法、SSD(Sum of Squared Differences)法、NCC(Normalized Cross Correlation)法、POC(Phase Only Correlation)法等が提案されている⁷⁾。本研究では、SSD法を応用した手法を利用している。

しかし、著者らが開発した本ソフトウェアは、単調なトンネル壁面の状態や照明また撮影条件等が影響し、画像結合時に発生する画像結合エラーの改善が課題となっていた。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。さらに、本研究では、既存トンネルを実際に撮影した画像から撮影画像の連結画像を作成し、本提案手法の有効性を検証する。

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。図-1には、著者らが開発を進めている撮影装置を搭載した撮影車両を示す。本撮影装置の特徴は、一般的な車両に搭載可能であるため、専用車両を必要としない点である。図-2には、撮影装置と撮影箇所のイメージ図を示す。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。なお、6台のカメラは、下部からV1、V2、V3、V4、V5、およびV6とする。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る。このため、トンネル壁面の撮影では、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により、トンネル壁面全体を撮影する。ここで、表-1には、本研究の検証で用いた既存トンネルおよび撮影条件を示す。本表中のピクセル長は、トンネル延長230mをピクセル単位で表したものである。また、撮影時間は、撮影箇所1か所あたりのトンネル壁面撮影の所要時間である。な



図-1 撮影装置を搭載した撮影車両

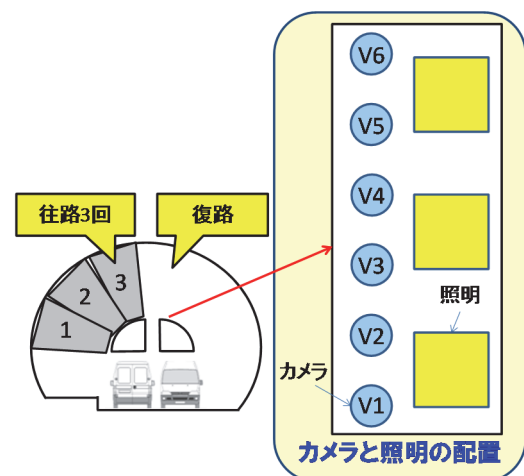


図-2 撮影装置と撮影箇所

表-1 撮影条件

項目	数値
トンネル長	230m
画素分解能	0.23mm/pixel
ピクセル長	1,000,000pixel
走行回数	6回
撮影車両の速度	30km/h
撮影時間	29秒

お、本研究では、往路の3か所を撮影した画像を検証に用いた。

(2) トンネル壁面画像展開図作成の流れ

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-3には、トンネル壁面画像展開図作成の流れを示す。また、表-2には、本研究の検証に使用した計算機の仕様を示す。トンネル壁面画像展開図作成では、まず、図-1の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

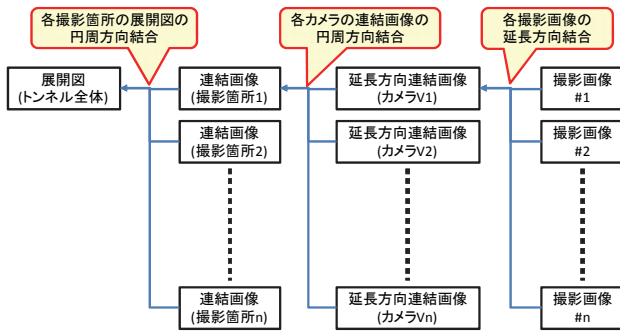


図-3 トンネル壁面画像展開図作成の流れ

表-2 計算機仕様

項目	仕様
OS	Windows7
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-2600 CPU(3.4GHz)
システムメモリ	16GB

れた連続撮影画像をトンネル延長方向へ結合する。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、本研究は、カメラごとに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過程を対象とする。ここで、本研究の検証で用いたキャプチャ画像の枚数は、カメラ1台あたり1771枚であり、キャプチャ画像のサイズは、1920×1080pixelである。

(3) 延長方向結合位置探索

本節では、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-4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軸およびY軸は、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中の左下の黄色の点は、図中の赤枠に示される探索範囲内での探索点を示す。一方で、本図中の緑枠は、類似度の計算対象範囲である。類似度の計算対象範囲は、前後画像の重なり領域であり、類似度はSSD法を用いて求める⁴⁵⁾。式(1)には、SSD法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

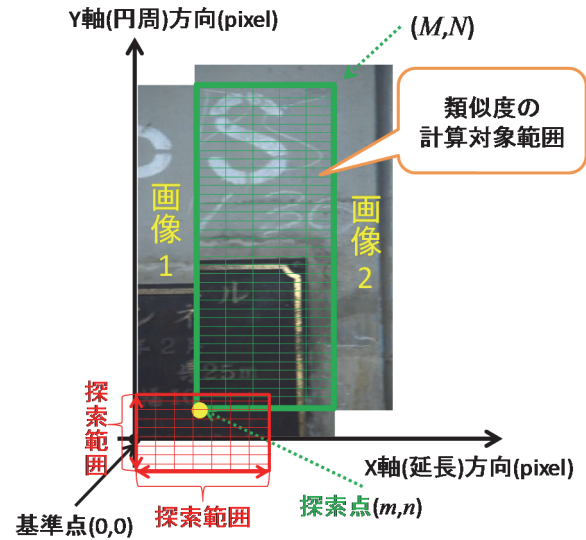


図-4 延長方向結合位置探索処理のイメージ

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SSD法であり、2枚の画像の重なり領域における画像間の画素値の差の2乗である。SSD法では、この値が小さいほど重なり領域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、 $I_1(i,j)$ および $I_2(i,j)$ 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領域の左下座標(m,n)また右上座標(M,N)である。ここで、(m,n)は、図-4中の赤枠に示される探索範囲内では、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、本研究では、式(1)の分子を重なり領域の面積(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、Sの値が小さいほど重なり部の類似度が高いとした。本研究では、図-4における基準点(0,0)から結合位置までのトンネル延長方向の移動距離を延長方向画像移動量と定義する。

表-3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。本研究では、延長方向結合位置探索の高速化を目的として、結合位置スキップ幅および類似度スキップ幅を設定した。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、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、スキップ幅を設定しない場合の81,911点から1,924点となった。

表-3 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
延長方向探索範囲	Xleft	0pixel
	Xright	810pixel
円周方向探索範囲	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

3. 補正手法

(1) 補正処理の必要性

本研究が対象とするトンネル壁面は、変状等がない箇所はおよそ単一色であり単調である。このため、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、式(1)中の分子である SSD 法の値の差異が小さくなることから、結合位置の誤検出が発生する可能性がある（結合エラー）。図-5 には、表-3 の条件で延長方向結合位置探索を実施した結果の 1 例として、トンネル延長方向の画像移動量グラフ（撮影箇所 1_カメラ 4）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。なお、トンネル壁面の撮影範囲は、画像組番号 178 から 1733 間である。本グラフを見ると、画像移動量 600pixel 周辺に、かろうじて適切な画像移動量と思われる推移が確認できる。しかしながら、撮影時には車両速度を一定にすること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化することはないが、本グラフでは、延長方向探索範囲の最小値 0 また最大値 810 の値をとる明らかな結合エラー箇所が全体的に発生している。

このように、結合エラーが発生した箇所では、画像移動量が正常値よりも小さい結合エラーの場合には、連結画像において画像の一部が欠ける。一方で、画像移動量が正常値よりも大きい結合エラーの場合には、同一箇所が重複して表示されるといった問題が発生する。図-6 には、画像移動量が正常値よりも小さい結合エラーの場合のみ多発した場合の連結画像イメージ図を示す。本図(b)に示されるように、結合エラーが発生した場合の連結画像では、正常に結合された場合と比べ、本図(a)に示される赤点線枠部分が欠ける。本研究で提案する画像移動量補正処理は、延長方向結合位置探索処理で生じる上記のような結合エラーを補正し、画像結合の精度を向上させることを目的としている。ここで、図-7 には、表-3

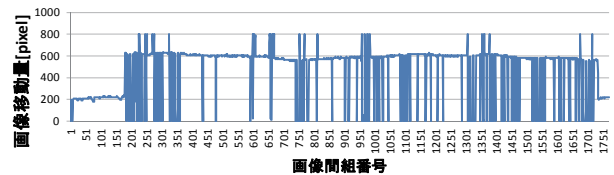
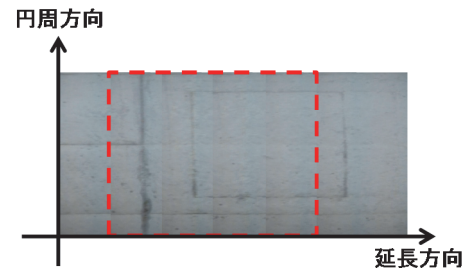


図-5 延長方向画像移動量グラフ



(a) 正常に結合された場合



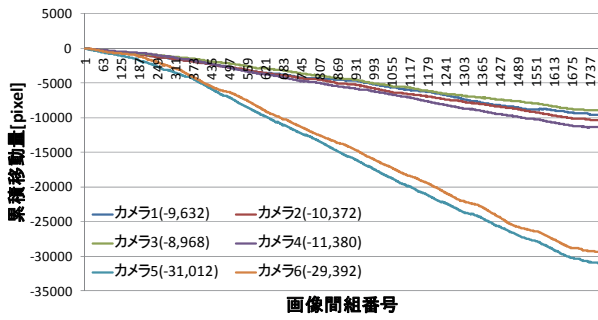
(b) 結合エラーがある場合

図-6 結合エラーのイメージ図

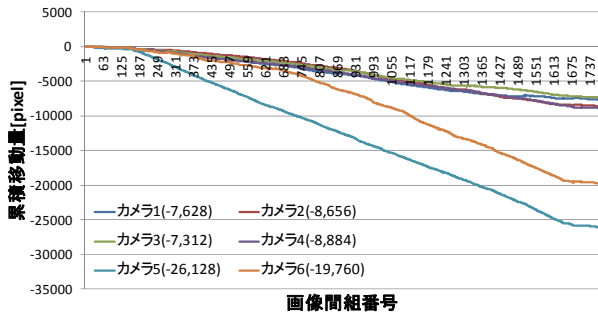
の条件で延長方向結合位置探索処理を実施した場合の結果であるトンネル円周方向の累積移動量グラフを示す。本グラフの横軸は、結合処理を行う前後画像を 1 組とした組番号である。一方で、縦軸は、図-5 における画像間組番号 0 から 1771 までの画像移動量の累積値である。本グラフに示されるように、円周方向累積移動量の最小値は-31,012pixel である。また、表-1 より、撮影対象のトンネル延長が 1,000,000pixel であることから、撮影時のカメラの傾きを求めると、最大で 1.8° となる。このため、撮影カメラは、コンクリート壁面に対して水平に設置されており、各カメラのトンネル延長方向の画像結合には、トンネル円周方向の画像移動量は影響しないと判断した。以上のことから、本研究で提案する補正手法は、延長方向画像移動量のみに対して実施することとし、各画像の結合時の円周方向画像移動量は 0 に固定した。

(2) 補正処理の流れ

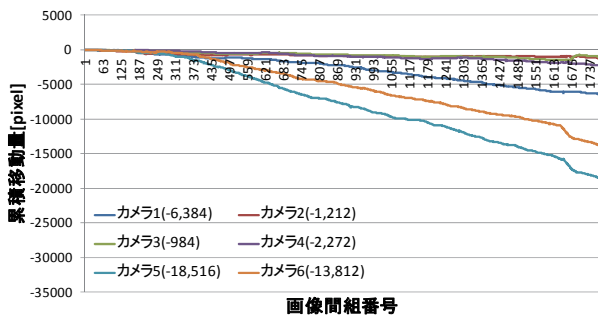
図-8 には、2. (3) の延長方向結合位置探索の結果であるトンネル延長方向画像移動量の補正処理フロー図を示す。本図に示されるように、まず、1次補正では、撮影時の車両速度また撮影条件から適切な画像移動量の範囲



(a) 撮影箇所1



(b) 撮影箇所2



(c) 撮影箇所3

図-7 円周方向累積移動量グラフ

を算出し、画像移動量を補正する。続いて、2次補正では、移動メディアンを用いた手法により、1次補正で補正しきれなかった結合エラーの補正を実施する。

(3) 1次補正

図-4 に示される前後画像間の移動量は、撮影装置が撮影車両に搭載されていることから、撮影車両の移動量に依存する。そこで、1次補正では、撮影装置また車両速度の情報より、実際の車両走行速度の変動範囲、すなわち車両移動可能範囲を、画像移動量範囲として推定し、その範囲外の移動量（外れ値）を補正する。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を補正する。図-9 には、1次補正のイメージ図を示す。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

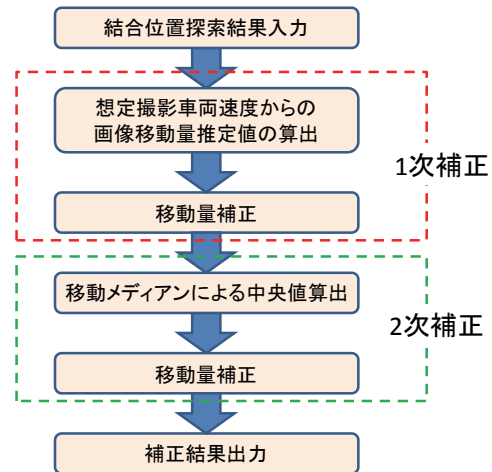


図-8 画像移動量補正処理フロー図

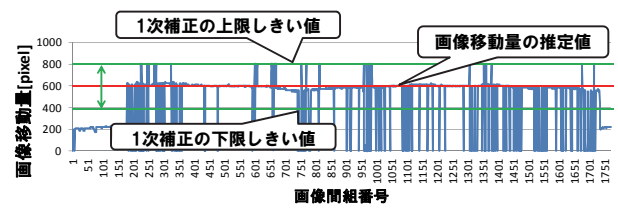


図-9 1次補正のイメージ図

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。なお、本図中の青線は、各画像間組番号における延長方向画像移動量である。また、赤線は、式(3)により算出された画像移動量の推定値である。さらに、緑線は、式(2)に用いられるしきい値(T_1)から求められる画像移動量の上限しきい値と下限しきい値である。

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

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

ここで、式(2)中の M_{ii} は 1 次補正終了時の延長方向画像移動量(pixel)、 i は注目画像間組番号、 m_i は 1 次補正前の延長方向画像移動量(pixel)、 T_1 はしきい値を示す。また、式(3)中の S_1 は前後画像間の画像移動量の推定値(pixel)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。

表-4 には、本研究の検証で利用した 1 次補正のパラメータ値を示す。表中の x は、撮影車両の速度 30km/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て走行していることから、撮影車両速度の変化は、 $\pm 10\text{km/h}$ 未満と判断したためである。

表-4 1次補正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(Si)	600pixel
1次補正のしきい値(T1)	200pixel

したがって、本研究における1次補正での補正対象は、撮影車両速度 20km/h 以下または 40km/h 以上で走行したと推定される画像移動量となる。

(4) 2次補正

1次補正では、トンネル区間内の撮影車両は定速と仮定していることから、局所的な車両の速度変化を考慮した補正を行うことができない。このため、2次補正では、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。図-10には、2次補正のイメージ図を示す。本グラフは、1次補正後の画像移動量グラフの一部である。なお、本図中の緑点線は、1次補正の対象となった画像移動量の範囲である。また、赤線は、式(5)により算出された画像移動量の中央値である。続いて、緑実線は、式(4)に用いられるしきい値(T2)から求められる画像移動量の上限しきい値と下限しきい値である。さらに、丸枠部分は、2次補正において補正対象となる画像移動量である。

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

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

ここで、式(4)中の M_{2i} は 2 次補正終了時の画像移動量 (pixel)、 M_{1i} は 1 次補正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、フィルタサイズ $2k+1$ (k は整数) の条件で、中央値を求める。なお、2 次補正は、複数回実施可能であり、本研究では 2 次補正を 2 回実施した。なお、表-5 には、本研究の検証で利用した 2 次補正の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。

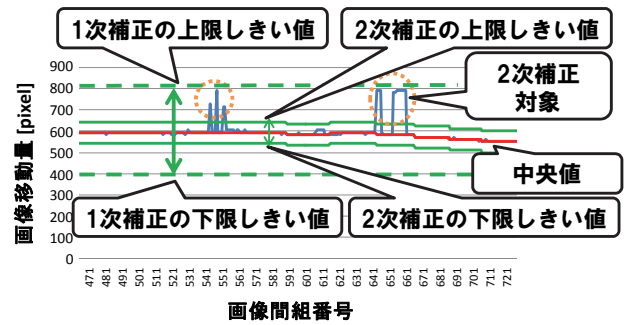


図-10 2次補正のイメージ図

表-5 2次補正で用いた実験パラメータ

	フィルタサイズ (2k+1)	2次補正のしきい値 (T2)
1 回目	201	50pixel
2 回目	41	10pixel

4. 実験結果

(1) 延長方向画像移動量

本節では、本研究で提案した補正手法の効果を延長方向画像移動量グラフより評価する。

a) 補正実施前

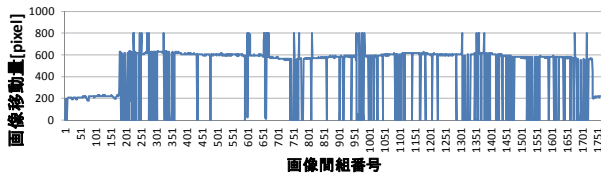
表-6 には、補正実施前の画像移動量における結合エラー率を示す。ここでは、トンネル内部を撮影した画像間組番号区間内 (画像間組番号 170 付近から 1700 付近の区間) で 1 次補正の補正対象となる画像移動量を結合エラーと定義した。また、結合エラー率とは、結合エラーと判断された画像組数を、トンネル区間の総画像組数で割った値である。図-11 には、本検証において結合エラー率が最小であった撮影箇所 1_カメラ 4、最大であった撮影箇所 3_カメラ 2、および 1 次補正の効果を示すための撮影箇所 1_カメラ 6 の補正実施前のトンネル延長方向画像移動量グラフを示す。本結果を見ると、すべての撮影箇所またカメラの多くで結合エラー率が 3 割から 5 割程度となっている。また、画像移動量グラフを見ると、画像移動量 600pixel 周辺に、かろうじて適切な画像移動量と思われる推移が確認できるが、結合エラーの割合が高いことがわかる。

b) 1 次補正実施後

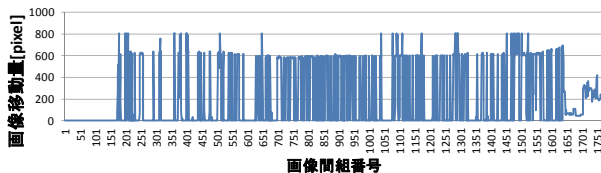
図-12 には、1 次補正のみを実施した場合のトンネル延長方向画像移動量グラフを示す。1 次補正実施後は、画像間組番号 151 付近以降において、グラフの波形が画像移動量 600pixel 前後を推移するように補正された。しかし、1 次補正において大きな結合エラーは補正されたが、周辺部と比較して明らかに結合エラーと認識できる箇所が局所的に見られる。

表-6 各撮影箇所またカメラにおける結合エラー率

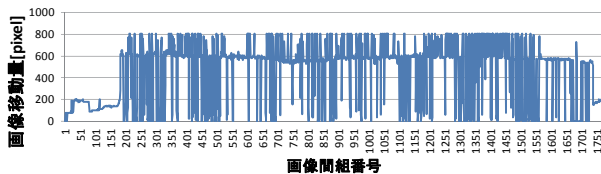
	撮影箇所1	撮影箇所2	撮影箇所3
カメラ1	40.5%	50.1%	57.9%
カメラ2	32.2%	51.3%	66.6%
カメラ3	37.1%	31.6%	58.8%
カメラ4	21.3%	30.2%	44.2%
カメラ5	23.2%	27.6%	42.6%
カメラ6	33.4%	41.7%	42.3%



(a) 撮影箇所1_カメラ4



(b) 撮影箇所3_カメラ2



(c) 撮影箇所1_カメラ6

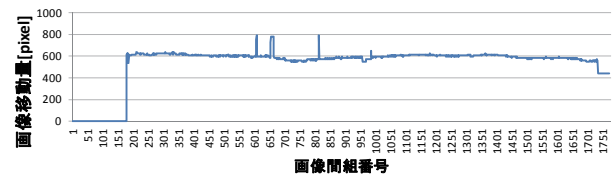
図-11 補正実施前の画像移動量グラフ

c) 2次補正実施後

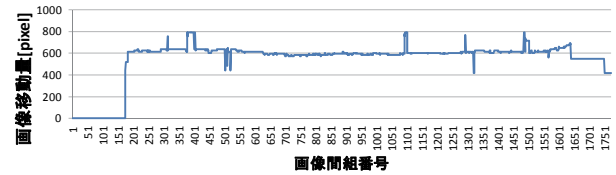
図-13 には、図-8 の移動量補正処理フローに従って 1 次補正と 2 次補正の両方を実施した場合のトンネル延長方向画像移動量グラフを示す。本図に示されるように、本補正実施後は、画像移動量グラフの波形が画像移動量 600pixel 前後を滑らかに推移するように補正されている。

d) 1次補正のしきい値の設定

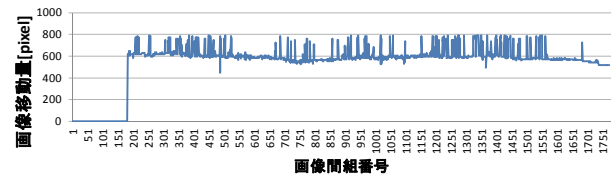
図-14 には、しきい値(T_1)の値を 100pixel とした場合の 1 次補正後の画像移動量グラフを示す。図-12 および図-14 を比較すると、しきい値(T_1)の値を小さく設定した図-14 の画像移動量グラフの方が滑らかな推移となっているが、図-13 の結果と比較すると、結合エラー箇所が散見され、十分に補正できていないことが分かる。以上のことから、1 次補正では、しきい値の範囲を小さくすることにより補正の効果が向上するが、1 次補正のみでは、十分な補正効果を得られないことがわかる。また、1 次補正のしきい値は、本研究では、撮影時の車両速度が定



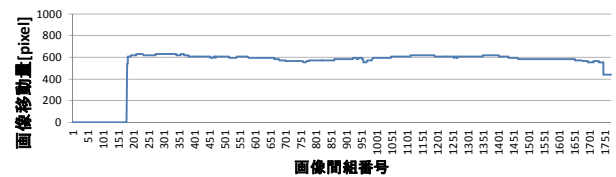
(a) 撮影箇所1_カメラ4



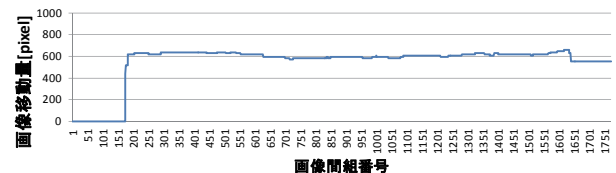
(b) 撮影箇所3_カメラ2



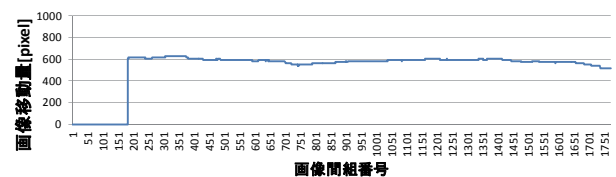
(c) 撮影箇所1_カメラ6

図-12 1次補正実施後の画像移動量グラフ($T_1=200$)


(a) 撮影箇所1_カメラ4



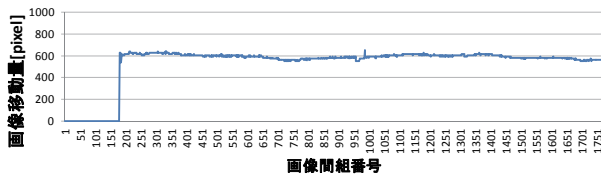
(b) 撮影箇所3_カメラ2



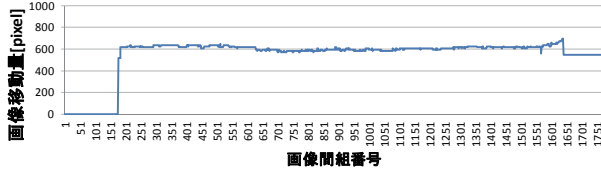
(c) 撮影箇所1_カメラ6

図-13 提案補正手法実施後の画像移動量グラフ

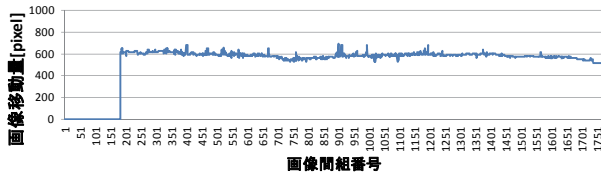
速であることを前提としている。このため、撮影時の車両速度が大きく変化する場合、適切な画像移動量を結合エラーと誤認識する可能性もあることに配慮する必要がある。なお、図-12、図-13 および図-14 では、画像間組番号 0 から 151 付近までの画像移動量が 0 となっているが、これはトンネル外部が撮影された箇所であるため、展開図作成の結合精度には影響しない。



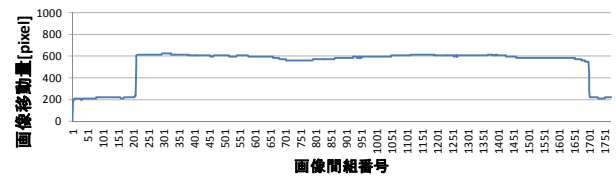
(a) 撮影箇所1_カメラ4



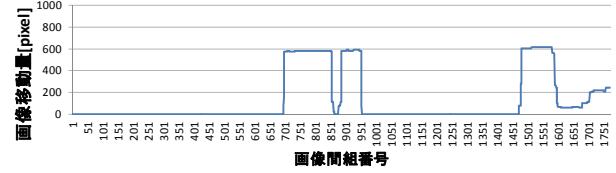
(b) 撮影箇所3_カメラ2



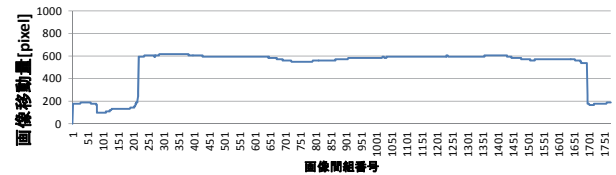
(c) 撮影箇所1_カメラ6

図-14 1次補正実施後の画像移動量グラフ($T_1=100$)


(a) 撮影箇所1_カメラ4



(b) 撮影箇所3_カメラ2



(c) 撮影箇所1_カメラ6

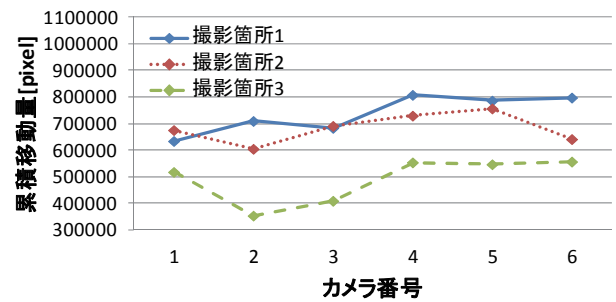
図-15 2次補正実施後の画像移動量グラフ

e) 1次補正の必要性

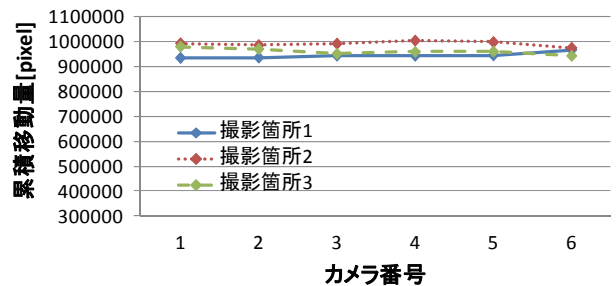
図-15には、1次補正を実施することなく、2次補正のみを実施した場合のトンネル延長方向画像移動量グラフを示す。本結果と図-13の結果を比較すると、2次補正のみを実施した場合は、結合エラー率の低い撮影箇所1_カメラ4の画像移動量グラフでは補正の効果が確認できた。しかし、結合エラー率の高い撮影箇所3_カメラ2の画像移動量グラフでは、適切な画像移動が推定できている箇所は少なく、連続して画像移動量が0となる結合エラー箇所が多く見られた。これは、補正実施前の画像移動量において結合エラーが多発していた箇所であることから、2次補正の中央値算出の際に結合エラーの影響を強く受けたためであると考えられる。このように、本検証では、他の多くの撮影箇所またカメラの画像移動量グラフで、図-14(b)と同様の傾向が見られたことから、2次補正だけでは補正手法として不十分であるといえる。

(2) 延長方向累積移動量

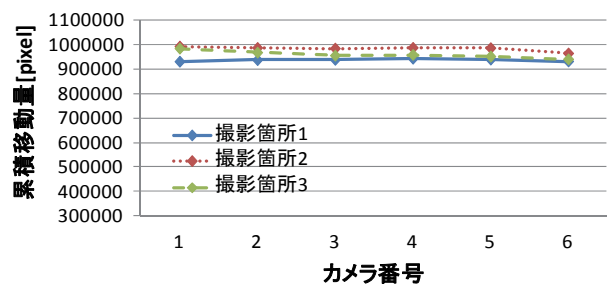
図-16には、補正実施前および各補正実施後の各撮影箇所またカメラごとの延長方向累積移動量グラフを示す。本グラフの横軸は、カメラ番号であり、図-2における撮影装置のカメラV1からV6に対応している。一方で、縦軸は、1台のカメラに対する前後画像移動量のトンネル延長方向累積移動量を示す。累積移動量は、画像間の結合位置が正しく求められた場合には、撮影条件は撮影回また各カメラにおいてほぼ同条件であることから、同様の値となる。本研究での撮影条件では、表-1に示される



(a) 補正実施前の結果



(b) 1次補正実施後の結果



(c) 1次および2次補正実施後の結果

図-16 各撮影箇所またカメラの延長方向累積移動量グラフ



図-17 補正実施前の連結画像

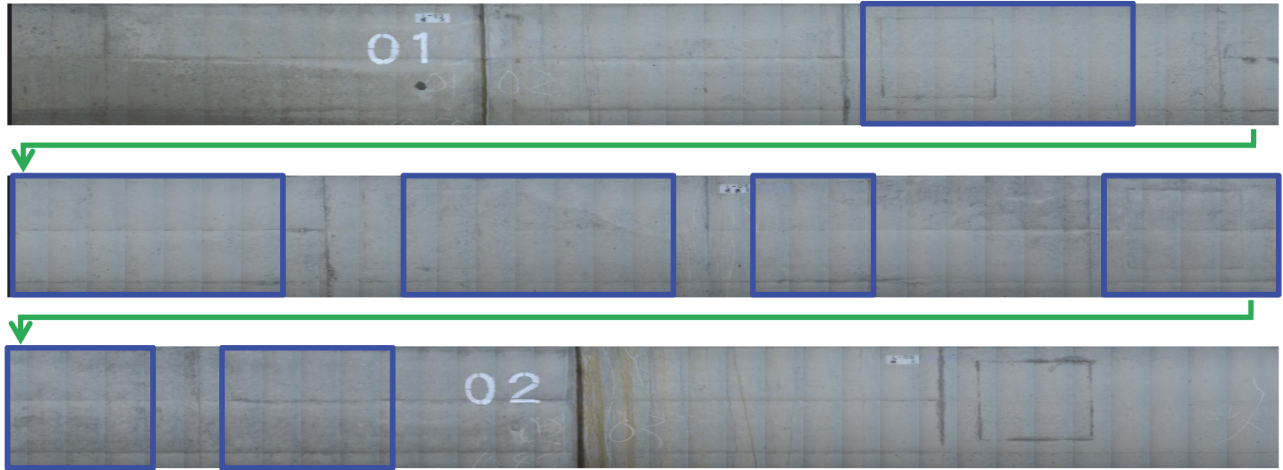


図-18 2次補正実施後の連結画像

ように、トンネル延長は、1,000,000pixel を理論値とみなすことができる。図-16 の結果を見ると、補正実施前の累積移動量は、すべての撮影箇所またカメラにおいて、理論値と大きく異なっているが、補正実施後は、撮影箇所またカメラにおいて大きなばらつきはなく、理論値に近づいており、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を比較すると、1次補正の効果が大きいことがわかる。

(3) 連結画像

図-17および図-18には、それぞれ撮影箇所1カメラ1より取得したキャプチャ画像を用いて作成した補正実施前の連結画像、また、1次補正および2次補正手法実施後の連結画像を示す。本結果を見ると、補正実施後の連結画像では、補正実施前の連結画像において欠けていた青枠部分の画像が出力されている。また、本連結画像では、1センチル分の累積移動量が、補正実施前および補正実施後において、17,300pixel(約4m)から52,000pixel(約12m)程度まで増加した。この結果は、1センチルは12.5mであることから、補正処理によって画像結合の精度が向上したことが分かる。

5. おわりに

本研究では、トンネル壁面画像展開図作成の結合精度向上を目的とし、延長方向結合位置探索で発生する結合エラーに対する補正手法を提案した。さらに、本研究で

は、実際のトンネルを撮影した画像からトンネル延長方向の連結画像を作成し、本提案手法の有効性を検証した。本検証では、延長方向結合位置探索での結合エラー率の観点から、本研究で提案した補正手法の効果を見ると、本補正手法の実施前では、表-6および図-11に示されるように、各カメラにおいて21%から67%程度の結合エラーが発生していたが、本補正手法の実施後では、図-13に示されるように、画像移動量グラフの波形が撮影車両速度と一致する滑らかな画像移動量600 pixel前後の推移に補正され、結合エラー率は、すべてのカメラにおいて0%となった。また、図-16を見ると、本補正手法実施前の延長方向累積移動量は、各カメラにおいて300,000pixelから800,000pixel程度の大きなばらつきが見られていたが、本補正手法実施後の累積移動量は900,000pixelから1,000,000pixel程度に収束しており、表-1に示されるトンネルのピクセル長(1,000,000pixel)に近似したことから、補正手法の効果が示された。さらに、図-18の連結画像結果に示されるように、本提案手法により結合エラーが改善され、補正実施前の連結画像では欠けていた画像が出力され、本提案手法の有効性が確認された。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適用し、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有限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 AS251142H の一課題として実施したものである。

参考文献

- 1) 後藤和夫, 篠原秀明, 下澤正道, 堀内宏信: トンネルの効率的な維持・管理のための変状調査・管理支援システムの開発, 地下空間開発における調査・計測に関するシンポジウム発表論文集(地盤工学会地下空間建設における調査・計測技術とその活用に関する研究委員会 編), 2006.
- 2) 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, 2007.
- 3) 重田佳幸, 齊藤優貴, 田近宏則, 石井博規, 下澤正道, 北澤隆一, 名古屋淳: トンネル定期点検の支援技術としての走行型計測システムの活用, 学術講演会講演論文集, Vol. 70, No. 3, pp.183-184, 2015.
- 4) 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.
- 5) 松本潤児, 河村 圭, 塩崎正人: トンネル壁面連続撮影画像からの画像処理による画像展開図作成の有効性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, pp.1783-1788, 2015.
- 6) 計測検査株式会社: トンネルの内部壁面のひび割れ検出方法, 特許 3276621 号, 2002.
- 7) 伊藤康一, 高橋徹, 青木孝文: 高精度な画像マッチング手法の検討, 信号処理シンポジウム, Vol.25, pp.547-552, 2010.

(2015. 10. 26 受付)

A STUDY ON PANORAMIC IMAGES GENERATION OF TUNNEL WALL

Kei KAWAMURA, Michihiro KOGA, Junji MATSUMOTO, Masando SHIOZAKI
and Shuji SAWAMURA

The inspection of road tunnels are mainly conducted by visual inspection. Therefore, there is a need for the automation. The authors have developed an inspection vehicle for tunnel lining concrete. The vehicle takes continuously scanned images of tunnel wall by using digital video cameras. In this study, an automatic image stitching method is developed by image processing techniques in order to generate panoramic images of tunnel wall from the scanned images. Furthermore, application to an existing tunnel is presented so as to demonstrate the validity of the proposed method.