

論文 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 手法の開発と検証

松本 潤児*1・河村 圭*2・塩崎 正人*3

要旨：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。そこで、本論文では、デジタルビデオカメラを用いた撮影装置から得られた画像をもとに、画像処理技術を用いて、撮影画像展開図を作成する手法の研究および有効性を検証した。

キーワード：画像処理、トンネル覆工コンクリート、展開図、テンプレートマッチング

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やラインスキャンカメラを用いた点検装置^{1),2)}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、点検装置の簡易化し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³⁾。本研究では、このデジタルビデオカメラを用いた撮影装置にて得られた撮影画像を自動的に連結し、トンネル壁面の撮影画像展開図を作成する画像処理手法の研究および結合精度の検証を行った。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

2.1 撮影手法

本研究の撮影装置は、トンネル壁面の撮影画像展開図の作成を目的として、車両に複数台の撮影用デジタルビデオカメラと照明を設置している。ここで、図-1には、本研究で用いた点検車両および撮影装置の設置図を示す。本図に示すように、撮影装置には、5台のカメラ（V1か

らV5）および照明が設置されている。また、本装置は、車両側面から車両上方までスライド可能である。このスライド機能を用いてカメラ位置を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。本装置の特徴は、装置コストが安価であり、分解可能で専用車両を必要としない点である。表-1には、本研究で用いた撮影カメラの解像度およびフレームレートなどの設定値を示す。

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、上記の撮影装置によって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トンネル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、さらに円周方向に連結し、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、最も結合作業時間を要するStep1の開発を対象としており、詳細は、3章に記述する。

3. 延長方向画像連結手法

3.1 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

*1 山口大学大学院 理工学研究科環境共生系専攻 (学生会員)

*2 山口大学大学院 理工学研究科環境共生系専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 三井住友建設株式会社 技術研究開発本部 技術開発センター (正会員)

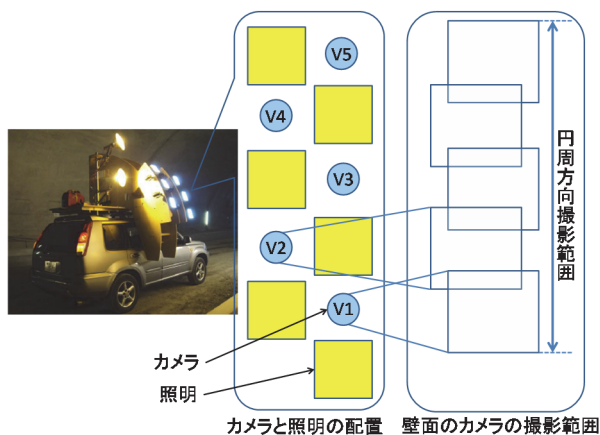


図-1 点検車両と撮影装置の設置図

表-1 撮影カメラの設定値

項目	数値
画像解像度	1920×1080(pixel)
フレームレート	60fps
カメラ台数	5台
センササイズ	5.45×3.06mm
焦点距離	28mm

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、事前に設定する探索領域内で画像2を画像1に対して、X軸（トンネル円周）方向またY軸（トンネル延長）方向に移動させ、2枚の前後画像の重なり領域内の全画素間の類似度を求める。探索領域内で、この類似度が最小となる箇所が、本手法による2枚の前後画像間の結合位置となり、画像2を画像1の上から重ねるように結合する。

(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、撮影画像のサイズが表-1に示される1920×1080であることから、結合位置の探索は、X軸方向およびY軸方向に対し、式(1)の範囲内で設定可能である。X軸方向またY軸方向の探索範囲は、それぞれ、車両の縦揺れによる画像のずれ、および車両の走行方向の移動に対応するためである。なお、図-3では、画像1の左上座標を、基点 $(0, 0)$ とする。

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

(2) 類似度計算

本研究では、前後画像の重なり領域の類似度計算は、式(2)より求めた。

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

ここで、式(2)右辺の分子は、テンプレートマッチング手法のSSD法（Sum of Squared Difference）⁴⁾を用いた。この値は、2枚の画像の重なり領域における画素間の画素

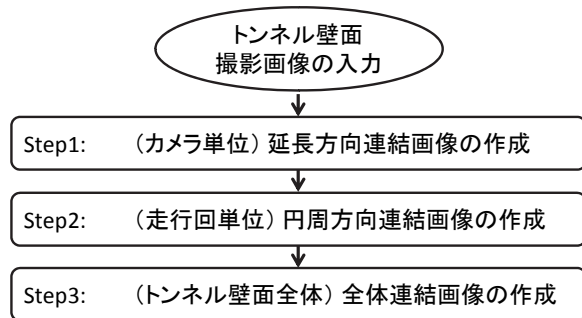


図-2 撮影画像展開図作成フロー

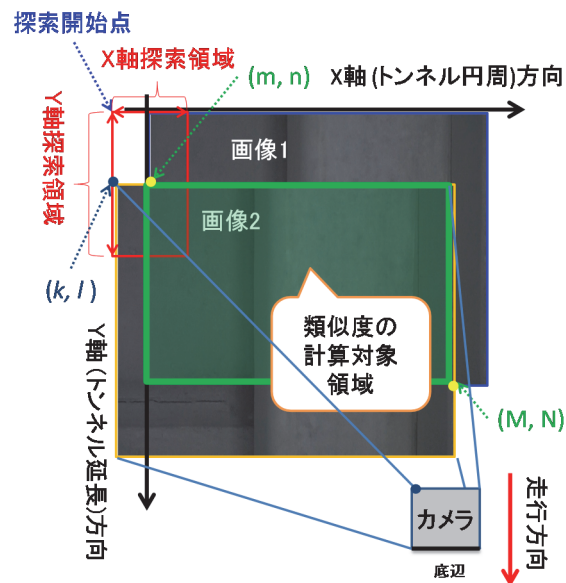


図-3 トンネル延長方向結合処理イメージ図

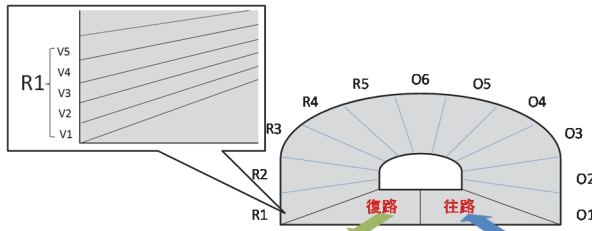
値の差から求められ、値が小さいほど重なり領域の類似度が高いと判定される。 (i, j) は、2枚の画像が重なった箇所の画像の (x, y) 座標を示し、 $I_1(i, j)$ および $I_2(i, j)$ は、それぞれ1枚目また2枚目の画像の座標（画素）ごとの画素値である。さらに、 m と n および M と N は、2枚の画像が重なった領域の左上座標 (m, n) また右下座標 (M, N) である。なお、式(2)右辺の分子は、結合の探索位置により、類似度計算の対象となる総画素数が異なる。このため、式(2)右辺の分子を、重なり領域の面積（画素数）で割ることにより、結合の探索位置の違いによる類似度計算の対象画素数の異なりを補正した。

3.2 結合処理の高速化

2枚の画像の結合位置の探索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、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。しかし、この方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、結合位置探索の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

表－2 撮影条件

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



図－4 各走行回の撮影位置関係図

似度計算対象の画素数を限定する）を行うことにより、計算量を減らし、結合位置探索の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枚程度と膨大になるため、連結画像に影響を与えない割合で画像を間引いた。

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は、全長735mの単心円トンネルである。なお、撮影時の画素分解能は0.4mm/pixelを基準とした。このため、画像1枚のサイズは、およそ762mm×432mmとなる。また、設定分解能を確保するため、撮影はレーザー距離計を用い、コンクリート壁面と撮影車両の距離が一定になるように行われた。正確に撮影された場合、トンネル延長のピクセル長は1,837,500pixelとなる。トンネルの撮影は、往路6回、復路5回の計11回となった。このため、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計55本となる。撮影は、4.0km/h程度で行われた。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、撮影装置に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。さらに、撮影は、一般車両と異なる走行方向で実施された。

(2) 画像連結条件

表－3には、本研究の実験で用いた、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、画素分解能および車両速度などの条件より、試行錯

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
X軸(円周)方向探索		-50~50
Y軸(延長)方向探索		0~540
結合位置 スキップ間隔	X軸(円周方向)	4pixel
	Y軸(延長方向)	11pixel
類似度計算 スキップ間隔	Y軸(円周方向)	4pixel
	Y軸(延長方向)	11pixel

誤で決定した。画像の間引き数は3とし、画像番号1, 5, 9...枚目を用いた。本実験では、図－3に示される赤枠範囲は、X軸（トンネル円周）方向探索領域を-50から50、Y軸（トンネル延長）方向探索領域を0から540とした。赤枠範囲で画像2を移動させる際の結合位置スキップ間隔は、X軸方向を4pixelと設定し、Y軸方向を11pixel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1300点となる。また、図－3の緑枠で示される重なり領域における、類似度計算スキップ間隔は、結合位置スキップ間隔と同様とした。

4.2 実験結果

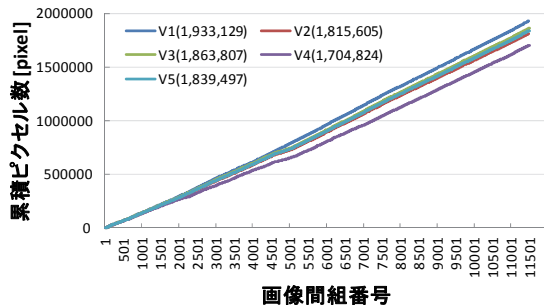
本節では、画像結合精度と結合時間の検証結果を示す。ここで、表－4には、本研究で用いた計算機の仕様を示す。また、図－5、表－5、図－6、さらに、図－7には、延長方向画像移動量に関する結合結果を示す。続いて、図－8および図－9には、円周方向画像移動量に関する結果を示す。最後に、図－10には、連結画像の結果を示す。

(1) 延長方向の結合精度の検証

ここでは、トンネル延長方向の画像間移動量の累積から、撮影および結合精度を検証した。図－5には、撮影箇所R1における各カメラ（V1からV5）の連結画像の延長方向累積ピクセル数の結果を示す。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。画像間組番号は、結合処理を行う前後画像を1組とした結合組番号である。また、累積ピクセル数は、図－3に示すように、各画像間組番号において、画像1に対し画像2がY軸方向に移動した移動量（ピクセル数）の、全画像組間での累積である。図－5の結果を見ると、各カメラの累積ピクセル長は同様な長さであり、撮影時の画素分解能（0.4mm/pixel）から求めたトンネル延長（1,837,500pixel）に近い値となっている。また、傾きはほぼ直線であり、本実験用の連続画像は等速で撮影されたことから、全体的に結合は良好に実施されていることがわかる。表－5は、撮影箇所R1における各カメラの画像間の平均結合誤差、また画像移動量がY軸方向探索領域の最大・最小値となった場合の回数である。なお、結合誤差は、次式(3)より求めた。

表－4 計算機仕様

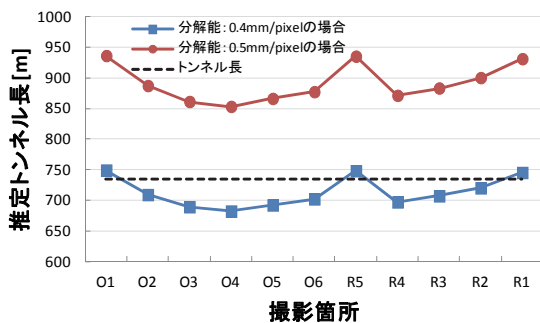
項目	仕様
OS	Windows7(32bit)
CPU	Intel(R)Core(TM)i7-2600(3.4GHz)
システムメモリ	8GB



図－5 撮影箇所R1の各カメラの延長方向累積ピクセル数

表－5 各カメラにおける平均結合誤差

撮影カメラ	1組当たりの誤差 (mm)	最小値(0) の回数	最大値(539) の回数
V1	-3.3	77	1
V2	0.8	8	0
V3	-0.9	69	3
V4	4.6	615	0
V5	0.1	14	0

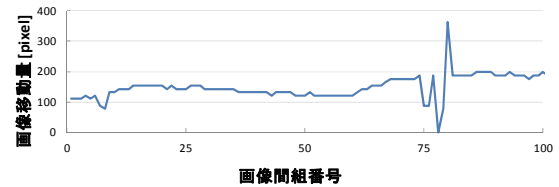


図－6 全撮影箇所の推定トンネル長

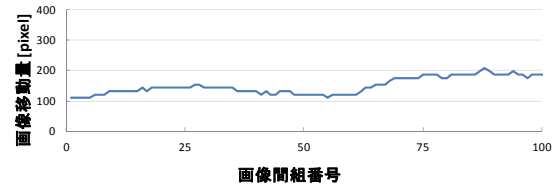
$$E = \frac{(\text{推定値} - \text{実験値}) \times \text{分解能}}{\text{画像組数}} \quad (3)$$

ここで、Eは前後画像の1組当たりの平均結合誤差(mm)である。実験値は、本手法の結合結果である延長方向累積ピクセル数である。推定値は、分解能を0.4mm/pixelとしたトンネル延長(1,837,500pixel)である。

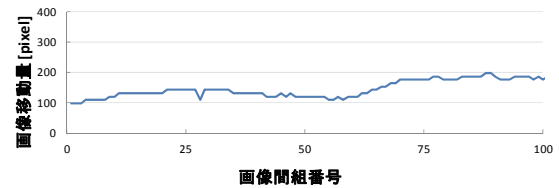
本実験では、表－3に示すように、Y軸(トンネル延長)方向の探索位置のスキップ間隔を11pixel(4.4mm)とした。このことから、表－5の結果を見るとカメラ4を除いては、結合誤差は、探索位置のスキップ間隔4.4mm



(a) カメラ V1 の延長方向画像移動量



(b) カメラ V3 の延長方向画像移動量



(c) カメラ V5 の延長方向画像移動量

図－7 撮影箇所 R1 のカメラ V1, V3, V5 の延長方向画像移動量グラフ

以内で結合位置を探索している。

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。ここでは、代表として、撮影装置中央に設置されたカメラ(V3)の結果を示す。なお、このトンネル長を逆解析した結果を推定トンネル長とする。また、グラフの縦軸および横軸は、それぞれ推定トンネル長および撮影箇所を示す。さらに、本図中の700から750m間の黒い点線は、実際のトンネル長(735m)を示す。図－6の結果を見ると、画素分解能を0.4mm/pixelと仮定した場合の結果(図中の青線)では、撮影箇所O1, R1およびR5の推定トンネル長は、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。この結果より、撮影箇所O1, R1およびR5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粗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、本実験対象のトンネルが、供用開始前であり、路面は未舗装の状態であったことから、わだち掘れにより、中央車線側のタイヤが下がり、撮影カメラからトンネル天井までの撮影距離が離れたためであると考えられる。図－6中の画素分解能を0.5mm/pixelと仮定した場合の結果(図中の赤線)を見ると、すべての撮影箇所の推定トンネル長が、実際のトンネル長よりも長くなっていることから、すべての撮影箇所画素分解能は0.4から0.5mm/pixelで撮影されたことがわかる。さらに、本研究では、前後画像間の移動量の結果から撮

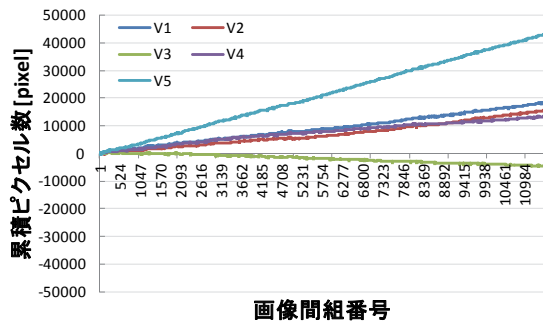
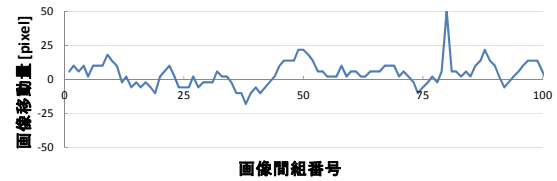


図-8 撮影箇所R1の各カメラの円周方向累積ピクセル数

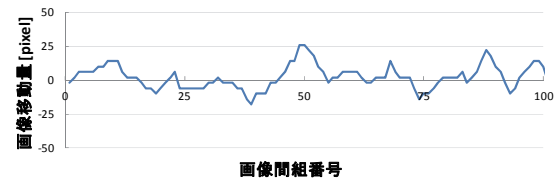
影および結合精度の検証を行った。図-7 には、撮影箇所 R1 における各カメラ (V1,V3,V5) の延長方向画像移動量グラフ (画像間組番号 1 から 100) を示す。なお、縦軸および横軸は、それぞれ画像移動量また画像間組番号を示す。図-7 の結果を見ると、カメラ V1,V3,V5 の全カメラにおいて、画像間組番号 1 から 100 の区間では、画像移動量がなめらかかつ同様の移動量で推移をしており、画像結合処理はおおむね正しく実施できている。また、画像移動量は、100 から 200 を推移しており、これをフレームレートおよび画素分解能により、速度に換算すると約 2.0 から 4.0km/h となる。したがって、撮影車両が 4.0km/h 程度で走行したことから、画像結合の妥当性が確認できた。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、結合ミスの個所が散見された。また、他の画像間組番号の区間においても、同様の傾向が見られた。これらスパイク状の極端な外れ値は、コンクリート壁面に特徴が少なく、照明ムラの影響を大きく受けたために結合ミスが発生したことが原因と考えられる。

(2) トンネル円周方向の移動量結果の検証

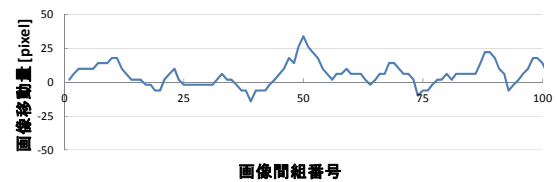
図-8 および図-9 には、撮影箇所 R1 における各カメラ (V1 から V5) の画像間円周方向移動量の累積ピクセル数の結果、また撮影箇所 R1 の各カメラ (V1,V3,V5) の円周方向画像移動量グラフ (画像間組番号 1 から 100) を示す。図-8 の結果を見ると、カメラ V3 以外の結果は、累積ピクセル数が徐々に上昇する傾向が見られた。図-8 の累積ピクセル数からカメラの傾きを推定すると、図-3 の基点に対して、カメラ V5 は、 1.36° 程度の左周方向へ傾いている可能性があることがわかる。このことから、図-8 の傾向は、カメラ設置時の傾きが影響していると考えられる。続いて、図-9 の結果をみると、各カメラの画像移動量は、同様の推移を示している。この結果より、車両の上下振動による撮影画像間の上下方向の移動 (結合位置) は、推定できていると考えられる。



(a) カメラ V1 の円周方向画像移動量



(b) カメラ V3 の円周方向画像移動量



(c) カメラ V5 の円周方向画像移動量

図-9 撮影箇所 R1 のカメラ V1, V3, V5 の円周方向画像移動量グラフ

(3) 連結画像結果による結合精度の検証

ここでは、本研究で提案した手法により結合された連結画像より結合精度を検証する。図-10 には、撮影箇所 R1 の各カメラにおける連結画像の先頭 1 セントル分を示す。本連結画像の作成には、図-5 に示されるように各カメラの累積ピクセル数 (画像連結長) が異なったことから、トンネル長に最も近い値を示したカメラ V5 の結果 (延長および円周方向の結合座標) を用いた。図-10 の V1 から V5 のカメラそれぞれの連結画像のコンクリート壁面を見ると、目視では結合ミスが判断できない程度の精度で結合が行えている。また、各カメラの連結画像を比較すると、円周方向での画像のずれは多少見られるが、おおむね良好に結合が行えている。

(4) 延長方向結合処理時間の検証

本実験では、表-4 に示す計算機また開発プログラムのタイム関数を用いて、カメラ 1 台の 1 回撮影分に対して、トンネル延長方向結合処理 (結合位置探索) に要する時間を測定した。なお、本実験では、カメラ 1 台の 1 回撮影分の全キャプチャー画像から、間引き処理を行った後の約 11,000 枚の画像に対する結合処理時間を測定した。この測定結果は、約 126 分であった。

5. おわりに

本研究では、デジタルビデオカメラを用いた車載撮影装置から得られたトンネルコンクリート壁面の連続撮影画像から、撮影画像展開図を作成する手法を提案した。



図-10 各カメラの連結画像（先頭1センチ分）

特に、撮影カメラ単位でのトンネル延長方向の画像連結手法を検討した。本提案手法は、実際の撮影画像を利用し、延長方向の結合では、連結された画像の累積ピクセル長、前後画像間の平均結合誤差、累積ピクセル長と画素分解能から逆解析を行って求めた推定トンネル長、さらに、隣接画像間の画像移動量の観点から結合精度を検証した。本実験結果より、画像の延長方向の結合精度は、図-5 から図-7 の結果に示されるように、局所的には前後画像間の明らかな結合ミスの箇所は散見されるが、全体的にはおおむね良好に結合が行えており、表-5 の結果に示されるように前後画像間の平均結合誤差は最大 5.0mm 以下となっている。円周方向の結合は、車両の上下方向の振動、また、カメラ設置時の傾きを推定できるほどの高精度で結合が可能であることがわかった。さらに、本提案手法は、代表カメラを用いた図-10 の結合画像からも良好な結果が得られた。しかしながら、本提案手法の結合処理時間は約 126 分であり、全 55 回の延長方向結合処理に換算すると、画像の結合位置探索に要する総時間は、約 116 時間と予想される。このことから、今後の課題として、画像結合位置探索手法の高速化が挙げられる。さらなる結合画像の高精度化のためには、局所的な結合ミスの補正手法の確立が必要である。また、本実験では、画像の歪みの検証を実施していないことから、今後検証する必要がある。

さらに、本研究は、画像処理を利用した撮影画像展開図の自動作成手法の開発を目的としたことから、次のステップとして、実験条件に利用した画素分解能 0.4mm/pixel での、変状検出能（例えば、最小検出ひび割れ幅など）の検証が必要である。なお、本検出能は、撮影環境、撮影条件、画像処理手法に大きく依存する。ま

た、通常、屋内での製品点検装置の開発では、欠陥を 3 画素で捉えるという基準が一般的である。すなわち、撮影装置や画像処理アルゴリズムの工夫により、基準以下の画素数で、欠陥を検出することも可能であるが、コンクリート壁面の点検を対象とした場合、撮影が屋外で外乱の影響が大きいこと、コンクリート表面の状態また変状の形状や色が多様であることから、点検装置の検出能は、その信頼性また汎用性を十分に検証する必要がある。この点検装置の検出能が明確になれば、点検に要求される検出するべき最小領域の大きさに従って、撮影装置の画素分解能を設定することが可能となる。

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、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, 2006.12
- 2) 鶴飼正人：ラインスキャンカメラによるトンネル変状検出画像処理、自動制御連合講演会講演論文集 48(0), 249-249, 2005
- 3) 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
- 4) 梅田和昇：画像処理の基礎、精密工学会誌 Vol.72 (2006)No.5, 2009.4