論文 トンネル壁面画像展開図作成における画像結合位置探索の精度向上 に関する研究

古賀 通博*1・河村 圭*2・塩崎 正人*3

要旨:現在,日本全国に存在するトンネルの多くが高齢化の問題を抱えている。このため,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より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手法の改良に関する研究を行った。本改良手 法の検証では,既存トンネルの撮影画像を利用して画像結合実験を行った結果,画像結合の精度の観 点から,既存手法よりも概ね高い探索性能を得た。

キーワード:デジタル画像処理,トンネル壁面コンクリート,点検,画像結合,反復局所探索法

1. はじめに

日本全国に存在するトンネルの多くが高度経済成長期 に建設されたものであるため、現在は、それらの高齢化 が問題となっており、トンネル点検の重要度が高まって いる。このため、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いる 1)。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 地方自治体では導入が容易でない現状である。そこで、 著者らは、専用車両を必要としない撮影装置開発、さら に、この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²⁾。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。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 等の影響による画像結合の精度の低下が問題となってい た。本研究では、トンネル延長方向の自動画像結合にお ける結合位置探索手法を改良するとともに, 既存トンネ ルを撮影した画像から、本改良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

2.1 撮影手法

図-1 には、著者らが開発を進めている撮影装置を搭載 した車両でトンネル壁面を撮影した様子を示す。本撮影 装置は、一般的な車両に搭載可能であり、専用車両を必 要としない。続いて、図-2 には、撮影装置と撮影箇所の イメージ図を示す。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(下部から V1, V2, V3, V4, V5, V6 とする)が設置されている。なお、本撮影装置は、1 回 の走行で撮影可能な範囲が限られていることから、トン ネル壁面の撮影では、撮影範囲を分け、トンネル内を複

*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) 技術開発センター (正会員)



図-1 撮影装置を利用したトンネル壁面撮影



図-2 撮影装置と撮影箇所

項目	数値		
トンネル長	230m		
撮影車両の速度	30km/h		
撮影時間	29秒		
画素分解能	0.23mm/pixel		
画像サイズ	1920 pixel × 1080pixel		
キャプチャ画像枚数	1560枚前後		

表-1 撮影条件

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 お、本研究の検証では、往路1の撮影画像を利用した。

2.2 延長方向画像結合の流れ

トンネル壁面画像展開図の作成では、V1からV6のカ



図-3 延長方向画像結合の流れ

メラで撮影された画像を、各カメラにおいてトンネル延 長方向へ連結した後に、各カメラのトンネル延長方向連 結画像を、トンネル円周方向に連結する。本研究は、各 カメラで撮影された画像のトンネル延長方向結合を対象 とした。ここで、図-3 には、著者らが提案した延長方向 画像結合の流れ ³⁾を示す。延長方向画像結合では、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れた連続撮影画 像の結合位置探索を行う。次に、出力された探索結果に おいて結合エラーが見られた場合には、画像移動量補正 を行う。最後に、画像移動量の補正結果を出力する。な お、本研究は、図-3 中の STEP2 の改良を行う。

2.3 延長方向結合位置探索(類似度計算法)

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。ここで、図-4 は、延長方向結合位置探 索のイメージ図である。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、類似度は式(1)より評価値を求める 2)。な お,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。

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

ここで、式(1)中の分子は SSD 法(Sum of Squared Difference)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。(*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、 $m \ge n$ および $M \ge N$ 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、任意の値を



図-4 延長方向結合位置探索処理のイメージ

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		数值 A	数值 B
延長方向	Xleft	0pixel	0pixel
探索範囲	Xright	810pixel	810pixel
円周方向	Ytop	_	50pixel
探索範囲	Ybottom	_	-50pixel
X軸方向結合位置スキップ幅		12pixel	12pixel
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		12pixel	12pixel
Y軸方向類似度計算スキップ幅		4pixel	4pixel

とる探索点である。なお,式(1)の分母は,重なり領域の 面積(画素数)である。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および円周方 向の移動距離を,それぞれ延長方向また円周方向画像移 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、結合位置探索範囲、結合位置スキップ幅, さらに類似度計算スキップ幅を設定した。

2.4 画像移動量補正処理

延長方向結合位置探索処理では、結合位置の誤検出が 発生する可能性がある。このため、著者らは、延長方向 移動量に対する画像移動量補正手法を提案した³)。本補正 手法は、1次および2次から構成される。1次補正は、画像 移動量が撮影車両の移動量に依存する性質を利用した補 正手法である。具体的には、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。2次補正は、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 た局所的な撮影車両の速度変化を考慮した補正を行う。

3. 延長方向結合位置探索(結合位置探索法)

3.1 既存手法

(1) しらみつぶし探索

著者らの既存の研究では、しらみつぶし探索^{2),3)}により、 画像間の結合位置を決定する。具体的には、図-4 に示さ れる探索範囲内で m と n の値を変更しながら式(1)による 類似度計算を行い、S(m,n)の最小値をとる(m,n)を結合位 置とする。なお、本研究では、既存の研究手法として、 表-3 の数値 A および数値 B を利用した 2 種類のしらみつ ぶし探索を行った。A は、延長方向の画像移動のみを考 量した探索であり、B は、延長方向および円周方向の画 像移動を考慮した探索である。

(2) 結合エラーの原因

図-5 には, 表-3 の数値 A 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(V1)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。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。図-6には、結合エラー箇所の1つで ある V1 の画像間組番号 1460 の連続画像間の結合位置探 索における評価値のプロットを示す。本図の横軸は、延 長方向の探索点であり、式(1)の mに相当する。一方で、 縦軸の評価値は、連続画像の類似度の指標であり、式(1) の S(m,n)に相当する。なお、本図の探索は、表-3 の数値 A に示されるように, m の結合位置スキップ幅は 12pixel, nの値は0に固定した結果である。

図-6 を見ると、実画像から判断すると緑丸点線箇所に おいて評価値が最小値となる探索点が適切な結合位置で あり、適切な結合位置は、評価値の極小値という特徴と して表れている。しかし、表-3 の数値 A の条件でのしら みつぶし探索では、赤丸実線箇所の探索点 0、すなわち 画像間の移動量が 0 となる箇所が、最小評価値となり結 合位置として探索された。このようなパターンが、図-5 の結合エラー箇所において多く見られた。

本結果を見ると、局所的な範囲(400pixel から 810pixel の範囲)では、適切な結合位置の類似度の評価値は、極小 値という特徴として表れる場合が多いが、コンクリート 表面は単調であること、また、照明等の影響により、探 索点の範囲が数値 A の範囲(0pixel から 810pixel の範囲)で の結合位置探索では、評価値の最小値は、適切な結合位



結合位置の決定
図-7 結合位置探索手法の処理フロー図

置以外に現れ,結合エラーの原因となることが分かった。 3.2 反復局所探索法を用いた探索手法

本節では,3.1節のしらみつぶし探索の検証結果を踏 まえ,本研究で提案する結合位置探索の改良手法につい て説明する⁴⁾。図-7には,本改良手法の処理フロー図を 示す。以下には,処理フロー内の各処理について説明す る。なお,表-4には,本改良手法におけるパラメータ値 を示す。また,本改良手法の画像結合位置の類似度計算 は,表-3の数値Aの条件で実施した。すなわち,円周方 向の探索は行わない条件である。

まず,本改良手法は,結合位置探索における初期探索 点を設定する。本改良手法は,反復局所探索法を用いた ものであるが,初期探索点の設定は,ランダムではない。 具体的には,撮影装置また車両速度の情報より式(2)に従 って,結合位置探索における現在点の初期点(探索開始 点)を設定する。

$$m_0 = \frac{x}{y \times z} \tag{2}$$

ここで、式(2)中の m_0 は、結合位置探索の初期点(pixel)を

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
初期点(m ₀)	600pixel
X軸方向結合位置スキップ幅	12pixel

表-4 提案手法におけるパラメータ値

示す。また, 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。続いて, 近傍探索点との 類似度比較では, 図-6 に示されるように, 現在点および その左右隣の探索点の評価値を調べる。なお, 近傍探索 点の位置は, 現在点および X 軸方向結合位置スキップ幅 により決定される。さらに, 探索点の移動では, 近傍探 索点の中から評価値が小さい方の探索点へ移動し, 新た な現在点とする。図-6 の場合では, 左側の探索点へと移 動し, 新しい現在点となる。この類似度計算と探索点の 移動を繰り返し, 現在点の評価値が左右隣の両点の評価 値よりも小さくなった場合, 探索を終了し, 現在点の座 標を結合位置として決定する。

4. 検証結果

本章では,結合エラー率,画像移動量,および累積移 動量の観点から,本改良手法による結合位置探索の結果 と,しらみつぶし探索の結果とを比較した。なお,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。また,しら みつぶし探索は、2 種類の異なる探索を行った結果を示 す。表-3 の数値 A および B の条件で実施した探索を,そ れぞれ,しらみつぶし探索(円周無)またしらみつぶし探 索(円周有)とした。

4.1 結合エラー率

表-5には、各探索手法を実施した場合の画像移動量に おける結合エラー率を示す。本検証では、撮影車両速度 に換算すると±10km/hの速度変化に相当する画像移動量 400pixel以下また800pixel以上の場合を結合エラーと定義 した。この理由は、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、±10km/h未満であると判断したためである。本表に 示されるように、しらみつぶし探索(円周無)では、結合 エラー率が約34%から約85%となっていたが、しらみつ ぶし探索(円周有)および反復局所探索では、すべてのカ メラにおいて結合エラー率が減少した。特に、反復局所 探索のV1から5では、その効果がより大きく現れた。し かし、V6では、しらみつぶし探索(円周有)の方が反復局 所探索よりも結合エラー率が大きく減少した。

表-5 各探索手法における結合エラー率

	しらみつぶし探索		反復局所探索
	円周無	円周有	(円周無)
V1	56.4%	40.5%	2.2%
V2	45.2%	32.2%	6.5%
V3	47.9%	37.1%	6.7%
V4	33.5%	21.3%	2.2%
V5	56.8%	23.2%	8.3%
V6	84.8%	33.4%	57.9%



4.2 画像移動量グラフ

図-9には、本検証のしらみつぶし探索(円周無)におい て結合エラー率が最小であったV4のトンネル延長方向画 像移動量グラフを示す。しらみつぶし探索(円周無)では、 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、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。一方で、反復局所探索および しらみつぶし探索(円周有)では、画像移動量が0となる結 合エラーが減少していることが分かる。特に、反復局所 探索では、その傾向が強く見られた。

図-10には、本検証のしらみつぶし探索(円周無)において結合エラー率が最大であったV6のトンネル延長方向画像移動量グラフを示す。図-10(a)および(b)に示されるように、しらみつぶし探索(円周無)および反復局所探索では、結合エラーが全体的に多く発生しているため、適切な画像移動量の推移が確認できない。一方で、図-10(c)のしらみつぶし探索(円周有)の場合は、画像移動量が0と



ごとの累積移動量グラフを示す。ここで、累積移動量と は、各カメラごとで出力された画像移動量の合計である。 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 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。撮影条件は各カメラにおいてほぼ 同条件であることから、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、同様の値となる。本グ ラフに示されるように、反復局所探索では、V1から5の 累積移動量が同様の値となったが、V6の累積移動量が他 と比べて極端に小さい値となった。V6の累積移動量が小 さくなる傾向は、しらみつぶし探索(円周無)の結果でも 同様である。しかし、しらみつぶし探索(円周有)の結果 では、この V6 の累積移動量のみが小さくなる傾向は見 られなかった。





4.4 移動量補正処理の実施結果

1000

200 0

図-12には、図-9に示されるV4の画像移動量を補正し た結果を示す。本グラフに示されるように、すべての探 索手法の結果が画像移動量600pixel前後を滑らかに推移す るように補正された。続いて、図-13には、図-10に示さ れるV6の画像移動量を補正した結果を示す。本グラフに 示されるように、円周方向の移動量を考慮しない場合は、



周辺部の画像移動量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。一方で、しらみつぶ し探索(円周有)の場合は、画像移動量600pixel前後を滑ら かに推移するように補正された。さらに、図-14には、各 カメラの移動量補正実施後の累積移動量グラフを示す。 本グラフに示されるように、移動量補正実施後の累積移 動量は、すべての探索手法において900,000pixel前後に補 正されており、大局的には、補正処理が有効に機能し、 結合精度を高めている。ただし、局所的には、図-13(a) および(b)に示されるように、補正できていない箇所が見 られた。

4.5 V6の結合位置探索の結合エラー原因

本改良手法の探索結果は、しらみつぶし探索の結果と 比較して、V1から V5では、高い探索性能を示した。し かし、V6 では、しらみつぶし(円周有)より探索性能が劣 る結果となった。この原因は、V6 がトンネル延長方向に 対してやや傾きを持って設置されていたこと, さらに, 撮影画像にコンクリート壁面より強い特徴を持つケーブ ルが撮影されていたことが挙げられる。具体例として, 図-15 には、V6の画像間組番号 82 における連続画像を示 す。本図の赤実線枠部分に示されるように、トンネル延 長方向にほぼ水平に設定されていたケーブルが、撮影画 像で同様の傾きを持って写っており、さらに、ケーブル の色また照明の反射光は同様の傾向で、V6のほぼすべて の画像で撮影されていた。本研究における類似度計算法 では、連続画像内に同一かつ強い特徴を持つ部分(赤実線 枠部分)がある場合は、他の部分の特徴(緑点線枠部分)よ りも強調される傾向があることから、円周方向の移動量 を考慮しなかった結合位置探索の場合は、コンクリート 壁面の特徴よりもケーブル上の反射等の特徴が強調され, 画像移動量 0 また 810 となる結合エラーが多発したと考 えられる。

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、反復局所探索法を利用した結合位置探 索手法を改良手法として提案した。さらに、本研究では、



図-15 V6 の連続画像の例

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 結合位置探索を行い,本改良手法の有効性を検証した。 結合位置の探索回数の観点から探索性能を見ると,本改 良手法の方が,しらみつぶし探索手法よりも効率的であ る。最適結合位置探索性能の観点から探索性能を見ると, 本検証の結果より,本改良手法は,しらみつぶし探索手 法よりも概ね高い探索性能を示した。しかしながら,カ メラが傾いて設置され,かつ,強い特徴を持つケーブル が撮影されている V6 の場合では,しらみつぶし探索(円 周有)の方が高い探索性能を示した。以上のことから,今 後,本改良手法に円周方向の移動量探索を考慮すると, 撮影画像の特徴変化に対してロバストな結合位置探索手 法になると考えられる。

謝辞:本研究にご協力頂いたテクノフラッシュ(株)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 お よび JSPS 科研費 15K06180 の助成を受けたものである。

参考文献

- 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
- 2) 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
- 3) 河村圭,古賀通博,松本潤児,塩崎正人,澤村修司: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,土木情報学シンポ ジウム講演集,Vol.40, pp.175-179, 2015
- 4) 柳浦睦憲,茨木俊秀:組合せ最適化 メタ戦略を中 心として - ,朝倉書店(株), pp.75-79, 2001