# (11) 局所探索法を用いたトンネル壁面展開図作成における画像結合精度向上に関する研究

吉崎　晶俊[1]・河村　圭[2]・古賀　通博[3]・塩崎　正人[4]・澤村　修司[5]

[1]学生会員　山口大学大学院　創成科学研究科電気電子情報系専攻（〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1）
E-mail: w103vg@yamaguchi-u.ac.jp

[2]正会員　山口大学大学院准教授　創成科学研究科電気電子情報系専攻（〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1）
E-mail: kay@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: v015vn @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

道路トンネル定期点検要領(H26)より，定期点検は 5 年に 1 回の頻度で実施することを基本とされたことから点検業務の効率化が期待されている．このような背景から，著者らは，トンネル変状およびトンネルの異常箇所の点検補助装置として，デジタルビデオカメラを用いた車載型撮影装置の開発を進めている．また，本点検装置を用いて，トンネル壁面を連続撮影した画像から，トンネル壁面の撮影画像展開図を作成するソフトを研究・開発している．しかしながら，著者らの既存研究の結合位置探索手法では，本ソフトにおけるトンネル延長方向の結合位置探索の精度が十分でなかった．本研究では，局所探索法を結合位置探索に用いた探索法を提案し，トンネル壁面の画像結合精度の向上を図った．

***Key Words:*** *tunnel lining concrete , inspection , panoramic image , image stitching , local search*

## 1. はじめに

現在，定期点検によるトンネル覆工コンクリートの点検作業は，点検員による上向きの近接目視点検を主体として実施されており，点検員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．また，トンネルの変状およびトンネルの異常個所の状況を具体的に記録するとともに，写真撮影を行う必要がある．このような背景から，著者らは，デジタルビデオカメラを用いた車載型撮影装置によりトンネル壁面を撮影し，トンネル延長方向を撮影したキャプチャ画像から，トンネル壁面の撮影画像展開図作成を行うソフトウェアを研究・開発している [1]．しかし，本ソフトウェアのトンネル延長方向の結合位置探索手法では，トンネル延長方向結合精度が十分でなかったことから，画像移動量補正手法を提案し，トンネル延長方向結合精度を向上させていた．そこで，本研究では，初期探索点として車両速度を考慮した，局所探索法を用いた画像間結合手法を新たに提案した．さらに，局所探索手法と既存探索手法を比較することにより，本探索手法の有効性を検証した．

## 2. トンネル壁面画像展開図作成

### (1) トンネル壁面の撮影

**図-1** には，本研究で用いた撮影装置を示す．本撮影では，車両に搭載されたカメラ 6 台（v01 から v06）で，各カメラの角度を変えながらトンネル内を複数回往復して撮影を行うことにより，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のトンネル長および撮影条件を示す．また，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 1558 枚であり，キャプチャ画像のサイズは，1920×1080pixel である．

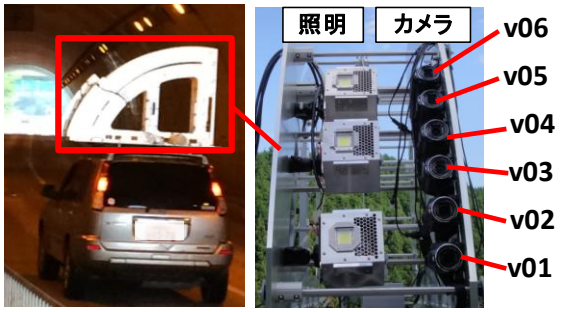



図-1　トンネル壁面撮影装置

表-1　撮影条件

| 項目 | 数値 |
|---|---|
| トンネル長 | 230m |
| 画素分解能 | 0.23mm/pixel |
| 走行回数 | 6回 |
| 撮影車両の速度 | 30km/h |

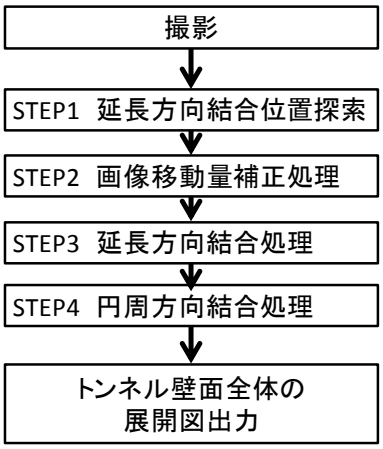



図-2　撮影画像展開図作成の流れ

### (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-2** には，トンネル壁面画像展開図作成の流れを示す．本流れは，4 つのステップから構成される．まず，STEP1 では，**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，カメラごとにキャプチャされた連続撮影画像の延長方向結合位置探索を行う．次に，STEP2 では，STEP1 で得られた結合位置の誤検出に対して，画像移動量補正処理を行い，キャプチャ画像間ごとの結合位置を決定する．続いて，STEP3 では，STEP2 で決定された結合位置からキャプチャ画像を結合し，各カメラごとのトンネル延長方向結合画像を作成する．最後に，STEP4 では，STEP3 から作成された各カメラごとのトンネル延長方向結合画像をトンネル円周方向に結合することにより，トンネル壁面全体の展開図を作成する．なお，本研究は，STEP1 の延長方向結合位置探索精度の改善を対象とする．

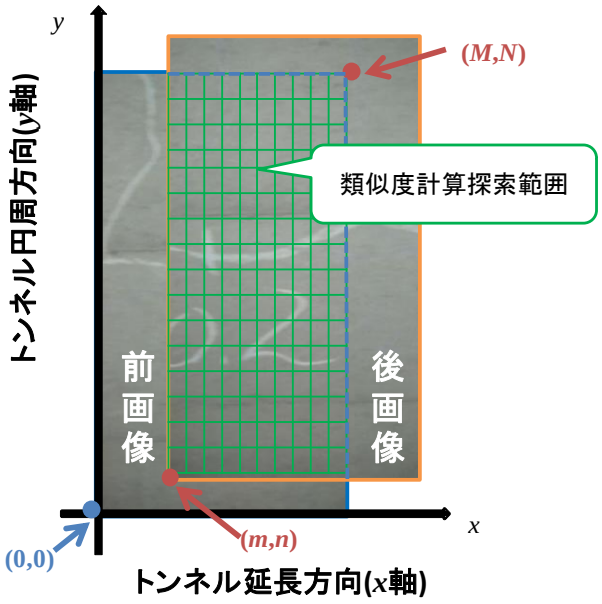



図-3　延長方向結合位置探索処理のイメージ図

### (3)　延長方向結合位置探索

延長方向結合位置探索では，カメラごとにトンネル延長方向を撮影したキャプチャ画像に対して，連続する前後画像間における結合位置探索を行う．ここで，結合位置探索は，キャプチャ画像間の重なりあった範囲に対して類似度計算を行うことにより，結合位置を決定する．

**図-3** には，延長方向結合位置探索における類似度計算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に対応する．**式(1)**には，SSD（Sum of Squared Difference）法を利用した類似度の算出式を示す．

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

ここで，$I_1(i,j)$および $I_2(i-m,j-n)$は，それぞれ前画像 $I_1$ また後画像 $I_2$ の各画素$(i,j)$また$(i-m,j-n)$における画素値である．なお，延長方向結合位置探索では，RGB それぞれの画素値に対して類似度の計算を行い，その合計値で類似度を評価する．さらに，**式(2)**から**式(4)**には，結合位置$(m,n)$を探索する問題の定式化を示す．

目的関数　$S(m,n)\rightarrow min$ (2)

制約条件　$0\le m\le 800$ (3)

$-50\le n\le 50$ (4)

**式(2)**は，画像移動量$(m,n)$を探索し，$S(m,n)$が最小値となる$(m,n)$を結合位置とする目的関数である．**式(3)**は，撮影車両の速度（0km/h からおよそ 40km/h）に相当する範囲であり，トンネル延長方向の移動範囲$m$の制約条件である．ここで，撮影車両の速度 30km/h に相当する$m$の値は 600pixel 前後である．**式(4)**は，撮影装置の振動を考慮し，$n$を設定した．

## 3. 延長方向結合位置探索手法

### (1) しらみつぶし探索法による探索手法

既存探索手法では，**式 (2)** から**式 (4)** の目的関数と制約条件のもと，しらみつぶし探索法により，探索領域内のすべての探索点において類似度計算を行う．

### (2) しらみつぶし探索法の問題点

既存探索手法であるしらみつぶし探索法の問題点として，本撮影装置で撮影した画像では，トンネル壁面の特徴が少なく，撮影時の照明のムラなどの影響から，実際の結合箇所としては不適切な結合位置が多数探索されたことが挙げられる．

ここで，**図-5** には，不適切な画像移動量(0,0)で結合された撮影画像のサンプル画像 2 枚を示す．具体的には，前後画像が完全に重なった状態で結合された．**図-6** には，サンプル画像 2 枚の各探索点における$S(m,n)$の値を示す．本図のサンプル画像 2 枚の結合位置探索では，$m$の解範囲では，12pixel 刻みに行い，延長方向 67 点の探索点を設定し，$n$の解範囲では，2pixel 刻みに行い，円周方向 51 点の探索点とした．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に対応している．また，$S(m,n)$の値に対して，色別にカテゴリー化を行っており，赤，オレンジ，黄色，青の順番に，$S(m,n)$の値が低いことを示す．ここで，各色別の$S(m,n)$の値は，赤が$S(m,n) \leq 200$，オレンジが$200 < S(m,n) \leq 250$，黄色が$250 < S(m,n) \leq 300$，青が$300 < S(m,n) \leq 350$を示す．**図-6** より，$(564,-10)$付近において，$S(m,n)$の極小値が存在することが分かる．また，本サンプル画像は$m$の値が 600pixel 付近で結合することが推定でき，目視による手動結合では，$(564,-10)$付近の位置に結合された．ここで，極小値は 2 箇所存在するが，画像移動量(0,0)で$S(m,n)$が最小値となるため，不適切な結合が行われた．

### (3) 局所探索法による探索手法

**図-6** の分析により，適切な結合位置において，極小値が存在することが分かった．そのため，本研究では，車両速度などから結合位置の推定が可能であることを考慮し，初期探索点として推測できる結合位置を求め，この位置の近傍から結合位置探索を行う局所探索法を利用する．局所探索法による探索手法は，以下の 4 つのステップで構成される．

STEP1　探索基準点$(m_i, n_i)$の初期探索点$(m_0, n_0)$の決定

本ステップでは，撮影時に得られた情報から結合位置を推定し，局所探索法の初期点とする．**式 (5)** には，初期探索点の算出式を示す．

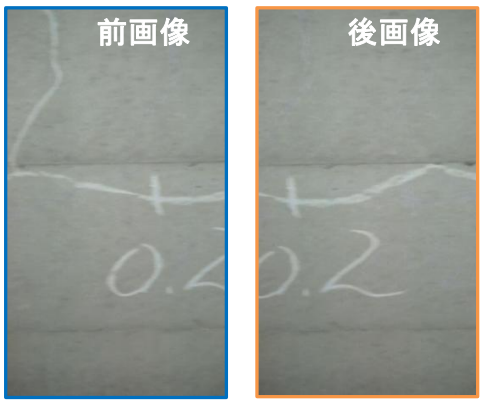



**図-5**　サンプル画像 2 枚

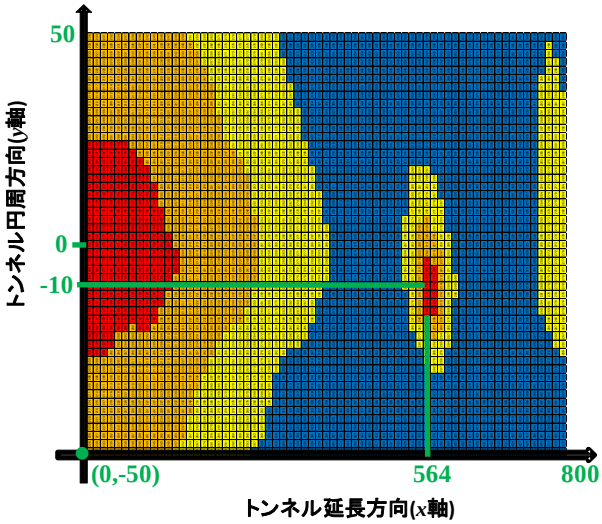



**図-6**　**図-5** のサンプル画像 2 枚における類似度計算結果

$$(m_0, n_0) = (\frac{a}{b \times c}, 0) \tag{5}$$

ここで，$i$は探索回数，$(m_0, n_0)$は探索基準点の初期点，$a$，$b$，また$c$は，それぞれ撮影車両の推定速度（mm/s），撮影画像のフレームレート（fps），および撮影画像の分解能（mm/pixel）である．

STEP2　探索基準点および 4 近傍探索点の類似度計算

本ステップでは，STEP1 または STEP3 で求めた探索基準点さらに探索基準点の 4 近傍探索点の類似度計算を行う．本ステップでは，**式 (6)** から**式 (10)** に示されるように探索基準点およびその 4 近傍探索点の探索点で類似度計算を行う．

$$S_0 = S(m_{i-1}, n_{i-1}) \tag{6}$$
$$S_1 = S(m_{i-1} + \alpha, n_{i-1}) \tag{7}$$
$$S_2 = S(m_{i-1} - \alpha, n_{i-1}) \tag{8}$$
$$S_3 = S(m_{i-1}, n_{i-1} + \beta) \tag{9}$$
$$S_4 = S(m_{i-1}, n_{i-1} - \beta) \tag{10}$$

ここで，α，βは近傍幅（pixel）を示す．

STEP3　探索基準点の移動

本ステップでは，STEP2 で行った類似度計算結果に対して，以下の条件 A から E に従って，**式 (11)** から**式 (15)**

により，探索基準点の移動を行う．

条件 A : $S_0 \leq min\ (S_1, S_2, S_3, S_4)$の場合

$$(m_i, n_i) = (m_{i-1}, n_{i-1}) \quad (11)$$

条件 B : $S_1 < min\ (S_0, S_2, S_3, S_4)$の場合

$$(m_i, n_i) = (m_{i-1} + \alpha, n_{i-1}) \quad (12)$$

条件 C : $S_2 < min\ (S_0, S_1, S_3, S_4)$の場合

$$(m_i, n_i) = (m_{i-1} - \alpha, n_{i-1}) \quad (13)$$

条件 D : $S_3 < min\ (S_0, S_1, S_2, S_4)$の場合

$$(m_i, n_i) = (m_{i-1}, n_{i-1} + \beta) \quad (14)$$

条件 E : $S_4 < min\ (S_0, S_1, S_2, S_3)$の場合

$$(m_i, n_i) = (m_{i-1}, n_{i-1} - \beta) \quad (15)$$

なお，条件 A を満たす場合，STEP4 へ進む．一方で，条件 A を満たさない場合，$(m_i, n_i)$を新しい探索基準点とし，STEP2 の処理を再び行う．

STEP4　結合位置の決定

本ステップでは，STEP3 において決定した探索基準点$(m_i, n_i)$を結合位置とし，結合位置探索を終了する．

## 4. 実験

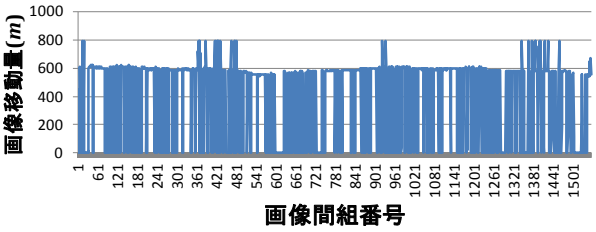
### (1) 実験条件

本実験では，既存探索手法および提案探索手法による結合精度を比較し，提案探索手法の有効性を検証する．既存探索手法では，**式 (3)** および**式 (4)** の制約条件のもと，$m, n$のそれぞれの定義域内の解探索点において，$m$は 12pixel 刻みに，$n$は 2pixel 刻みに結合位置の全探索を行った．提案探索手法では，**表-1** および**式 (5)** より，初期点$(600,0)$とした．また，提案探索手法の近傍幅は，α は 12pixel，βは 2pixel とした．

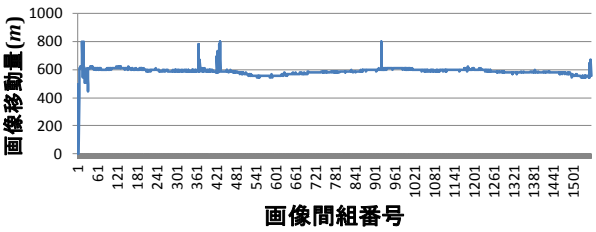
### (2) 実験結果

**図-7 (a)** および **(b)** には，それぞれ既存探索手法および提案探索手法の画像移動量グラフを示す．縦軸はトンネル延長方向の画像移動量$m$，横軸は画像間組番号を示す．ここで，画像間組番号とは，結合処理を行う前後画像を 1 組とした組番号である．なお，$m$の適切な推移は，撮影時の条件から 600pixel 付近である．また，**表-2** には，既存探索手法と提案探索手法の結合エラー率を示す．ここで，結合エラー率は，結合エラー数をトンネル壁面撮影画像数 1558 枚で割った百分率である．なお，結合エラーは，撮影車両の速度を考慮し，結合位置においてトンネル延長方向の画像移動量$m$が 500pixel 以下（およそ 25km/h）または 700pixel 以上（およそ 35km/h）とした．

**図-7 (b)** の結果より，提案手法では，$m = 0$などの結合エラーが減少し，適切な推移が確認できるようになった．また，**表-2** の結果より，提案探索手法では，結合エラー率が全てのカメラで大幅に減少した．




(a)　既存探索手法




(b)　提案探索手法

**図-7　画像移動量グラフ**

**表-2**　結合エラー率

| カメラ | 既存探索手法 | 提案探索手法 | 減少率 |
|---|---|---|---|
| v01 | 41.3% | 1.9% | 39.4% |
| v02 | 32.7% | 2.7% | 30.0% |
| v03 | 37.8% | 7.2% | 30.6% |
| v04 | 21.5% | 2.1% | 19.4% |
| v05 | 23.7% | 3.2% | 20.5% |
| v06 | 40.2% | 3.6% | 36.6% |

## 5. おわりに

本研究では，結合精度の向上を目的とし，局所探索法を利用した手法を提案した．本実験結果により，提案探索手法の結合精度が既存探索手法よりも向上したことから，提案探索手法の有効性が確認できた．

**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，JSPS 科研費 15K06180 の助成を受けたものである．

### 参考文献

1)　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，土木学会論文集 F3, Vol.71, No. 2, pp.I_142-I_151, 2016.