

トンネル覆工面撮影画像の歪み補正手法

(公財)鉄道総合技術研究所 正会員 ○鶴飼 正人
 西日本旅客鉄道(株) 正会員 御崎 哲一
 西日本旅客鉄道(株) 正会員 坂本 保彦

1. はじめに

近年、人手によるトンネル検査方法に代わって、ラインやエリアカメラを用いたトンネル検査システムが開発され、その効果が報告されている。一般的に撮影画像にはカメラ光学系の歪み、いわゆるレンズ歪みが発生する。例えば馬蹄形のトンネルを撮影した場合、断面形状が複雑な曲面であることから、断面方向の各画素の画素ピッチが一定でない画像が撮影される。この画像を用いて変状抽出を行った場合、歪みの影響により変状位置が微妙にずれるため、個別検査で指示する位置データの精度が低下するという課題がある。そこで、位置特定精度の向上を図るため、トンネル断面方向の歪みを補正する正規化アルゴリズムを検討した。

2. ゆがみ補正手法の概要

カメラと壁面が正対している時に、カメラ受光部分の中心部分でとらえられた画像は、壁面に対して縮尺が違うだけで、その他の歪みは発生しない。この状況で撮影された壁面の微小区間を基準壁面と呼ぶ。この基準壁面上で等距離撮影ができれば、歪みのないトンネル壁面画像を得ることができる。図1に示す画面上の Δh が、ゆがみの無い $\Delta h'$ となるよう補正できればよいので、補正率 $\Delta h'/\Delta h$ を算出する。なお、トンネル壁面とカメラ位置、向きなどの情報は得られるものとした。

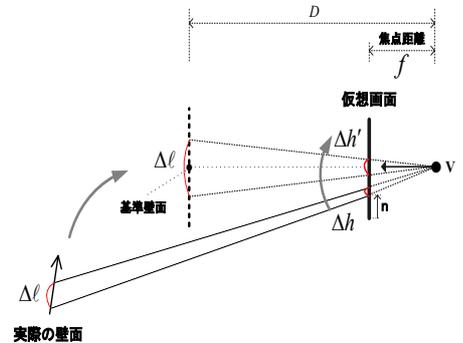


図1 基準壁面と画面上の長さの関係

3. 補正率の算出法

まずトンネル断面方向を小さなセグメントに分割して、それぞれの部分について、断面方向の拡大、縮小率を求める。図2に示すように、セグメントは直線として近似した。まず、長さ $\Delta\ell$ の壁面がカメラのレンズ面から距離Dだけ離れた基準壁面上にある場合における画面上の長さ $\Delta h'$ について求める。これは単純な比例関係から、

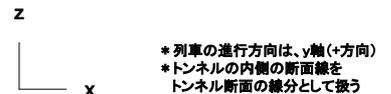
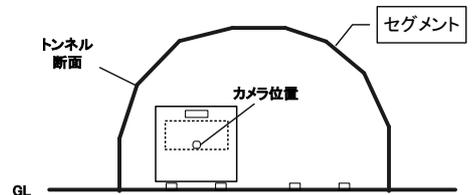


図2 トンネル断面とセグメント

$$\Delta h' = \frac{f}{D} \Delta \ell \dots\dots\dots(1)$$

として得られる。次に、カメラの焦点位置を頂点とし、対象としている画面上の長さ Δh の区間と、対応する壁面上の長さ $\Delta\ell$ の区間で囲われる2つの三角形について検討する。2つの三角形は頂点からの2つの辺を一部共有している。頂点と2辺の関係を図3に示す。ここで \mathbf{c}'_n の位置は、カメラ焦点から \mathbf{p}_n 、 \mathbf{c}_n を経由したベクトルを用いて以下のように表すことができる。

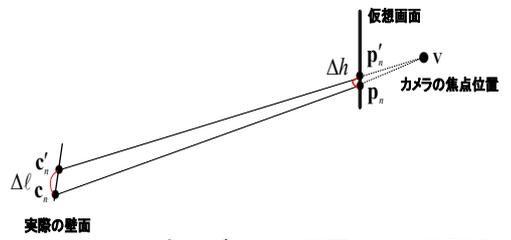


図3 対象セグメントと画面上の位置関係

$$\mathbf{c}'_n = \mathbf{c}_n + \frac{\Delta\ell}{|\mathbf{l}_i|} \begin{bmatrix} x_{i1} - x_{i0} \\ z_{i1} - z_{i0} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

(x_{i0}, z_{i0}) は \mathbf{c}_n の、 (x_{i1}, z_{i1}) は \mathbf{c}'_n の座標である。また、 \mathbf{l}_i はセグメント上の線分ベクトル、 \mathbf{v} はカメラ焦点の位置ベクトル、 $\mathbf{e}_n = \begin{bmatrix} e_x \\ e_z \end{bmatrix}$ はカメラの視線ベクトル、 $\mathbf{P}_n = \begin{bmatrix} p_x \\ p_z \end{bmatrix}$ は投影ベクトルである。 \mathbf{c}'_n の位置は(2)式の他に、カメラ焦点から \mathbf{p}'_n を経由したベクトルを用いて、

キーワード 鉄道, トンネル, カメラ, 画像処理, 歪み補正, 正規化
 連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 信号システム TEL 042-573-7325

$$\mathbf{c}'_n = \mathbf{v} + \beta \left\{ \mathbf{p}_n + \Delta h \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \frac{\mathbf{e}}{|\mathbf{e}|} - \mathbf{v} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

とも表せる. ここでの β は未知数である. 2つの式によって表現された点 \mathbf{c}'_n は同じ位置を表すので

$$\mathbf{c}_n + \frac{\Delta l}{|\mathbf{l}_i|} \begin{bmatrix} x_{i1} - x_{i0} \\ z_{i1} - z_{i0} \end{bmatrix} = \mathbf{v} + \beta \left\{ \mathbf{p}_n + \Delta h \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \frac{\mathbf{e}}{|\mathbf{e}|} - \mathbf{v} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

が成り立つ. この式から x 座標と z 座標についての2つの関係式が得られるので, 未知数 β を消去し, (1)式から得られる Δl を代入すると Δh は

$$\Delta h = \frac{|\mathbf{e}| \frac{D\Delta h'}{f|\mathbf{l}_i|} ((p_z - v_z)(x_1 - x_0) - (p_x - v_x)(z_1 - z_0))}{\gamma(e_x(p_x - v_x) + e_z(p_z - v_z)) + \frac{D\Delta h'}{f|\mathbf{l}_i|} (e_x(x_1 - x_0) + e_z(z_1 - z_0))} \dots\dots\dots (5)$$

となる. ここで,

$$\begin{aligned} A &= \gamma f |\mathbf{l}_i| (e_x(p_x - v_x) + e_z(p_z - v_z)) \\ B &= D |\mathbf{e}| ((p_z - v_z)(x_1 - x_0) - (p_x - v_x)(z_1 - z_0)) \\ C &= D (e_x(x_1 - x_0) + e_z(z_1 - z_0)) \end{aligned} \dots\dots\dots (6)$$

とにおいて, $\Delta h' / \Delta h$ について解くと, (7)式が得られる.

$$\frac{\Delta h'}{\Delta h} = \frac{A}{B - C\Delta h} \dots\dots\dots (7)$$

4. テスト画像を用いた補正手法の検証

提案手法による補正具合を検証するために, サンプル画像から求めた補正率と, 曲面の形状データから算出した補正率との整合性を確認した.

(1) 撮影画像を用いた補正率の算出

図4に示すように, メッシュ状に描画した用紙を貼った模擬トンネル壁面をサンプル画像として撮影した. セグメントはトンネル断面方向に20個で, 画像からセグメントの長さを測定し, これから求めた補正率を表1に示す.

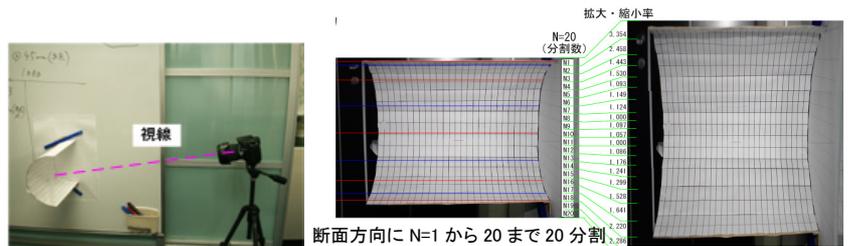


図4 サンプル画像

N=11を基準(1.0)として, 上下に拡大して正規化した画像

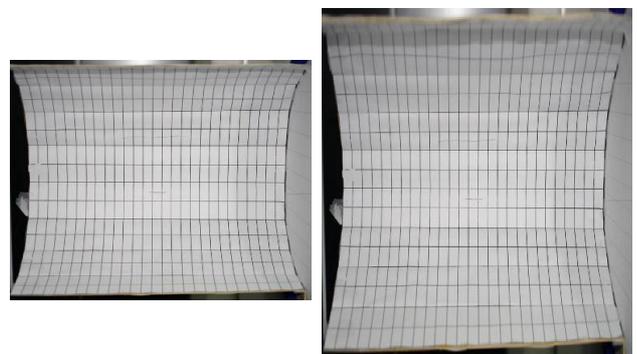
表1 サンプル画像から求めた補正率

画像位置	上側 ← → 下側																			
分割番号	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20
拡大・縮小率	3.354	2.458	1.443	1.530	1.093	1.149	1.124	1.000	1.097	1.057	1.000	1.086	1.176	1.241	1.299	1.528	1.641	2.220	2.286	2.286

(2) 曲面データを用いた補正率の算出

サンプル画像の分割番号 N14-N15の部分の形状データから補正率を算出する. なお, 焦点距離 $f=45\text{mm}$, $D=845.5\text{mm}$ である.

(6)式より $A=1471770$, $B=1217596$, $C=23082.15$ と計算されるので, これより $\Delta h=1.704$ となり, $\Delta h' / \Delta h = 1.249$ となる. 表1より, サンプル画像から実測して求めた補正率は 1.241~1.299 なので, 形状データから計算式を用いて得られた補正率とほぼ一致している. サンプル画像の補正結果を図5に示す. 水平方向の線分は本来等間隔であるが, 曲面を撮影したことにより補正前画像では上下で間隔が狭くなっている. それに対し, 補正後画像ではほぼ等間隔となり, 本来の壁面に近い画像が得られていることがわかる.



(a) 補正前 (b) 補正後
図5 歪み補正前後のサンプル画像

5. まとめ

エリアカメラなどで撮影したトンネル覆工面画像を, 断面の形状データを用いて算出した補正率に従って正規化する手法を提案した. 変状の位置特定精度の向上策として有効であると考えられる.