

(45) トンネル点検用撮影画像の シミュレーション

鑑谷 賢治¹・菊地 太郎²

¹株式会社リコー デジタルビジネス事業本部 (〒243-0460 神奈川県海老名市泉 2-7-1)

E-mail: kenji.kagitani@jp.ricoh.com

²株式会社リコー デジタルビジネス事業本部 (〒243-0460 神奈川県海老名市泉 2-7-1)

E-mail: taroh.kikuchi@jp.ricoh.com

トンネル点検業務の効率化や省力化を図ることを目的とした写真画像による点検支援技術が注目されている。この技術で変状の検出や測定などを高精度に行うためには、その撮影画像は変状の検出工程や測定工程などの後工程が要求する画像品質を満たす必要がある。この画像品質は、撮影条件や撮影システムの工学的性能だけでなく、撮影対象であるトンネル壁面や変状の状態からも大きな影響を受けるが、トンネル壁面や変状の状態を定量的に取り扱うことはこれまで困難であった。本研究では、トンネル壁面や変状の状態を定量的に取り扱う方法と、この方法を用いて写真画像によるトンネル点検支援システムの性能を定量的かつ実用的にベンチマークすることを可能とするトンネル点検用撮影画像のシミュレーション方法を開発したのでこれを報告する。

Key Words: tunnel inspection, cracks, detection, measurement, image quality, simulation

1. 背景・目的

トンネル壁面を撮影する撮影工程と、撮影画像から変状の抽出や変状の程度の算出を行う画像解析工程から構成される写真画像を用いたトンネル点検業務支援技術が注目されている^{1) 2)}。この技術を定量的に設計するためには、最終的な要求精度を定量的に決定し、これを実現するために必要な撮影画像品質と画像解析性能とを対にして決定する必要がある。撮影画像品質に影響する要因としては撮影系の要因だけでなく、撮影対象であるトンネル壁面と変状の状態も考慮する必要がある。撮影系の要因に関しては、1画素あたりに結像する実寸長で表される解像度、点像分布関数 (point spread function, PSF) や変調伝達関数 (modulation transfer function, MTF) などとして扱われるばけ、SN比などとして扱われるノイズなど定量的に取り扱うことが可能であるが、撮影対象であるトンネル壁面や変状の状態については、定量的な取り扱い方法が未確立であり、トンネル点検支援システムの設計仕様値決定が困難となり、開発の長期化や品質保証の曖昧さを招く一因となっている。また、トンネル点検業務の撮影作業と画像解析作業を実施する業者が異なる場合もあり得るが、予め定量的な仕様で整合を図れない

と重大な支障をきたす可能性がある。さらに、画像解析手法として、例えばひび割れのような変状を検出する手法³⁾、あるいは測定する手法^{4) 5)}が様々提案されているが、同様の理由で適用可能範囲や精度を比較してベンチマークすることが困難となっている。これらを考慮すると、写真画像を用いたトンネル点検支援技術の開発や利用を推進するためには、トンネル壁面や変状の状態の定量的な取り扱いを可能とする技術の獲得が必要である。

本研究では、トンネル壁面とその代表的変状であるひび割れの状態の定量的取り扱い方法と、写真画像によるトンネル点検支援システムの定量的かつ実用的なベンチマークを可能とするトンネル点検用撮影画像のシミュレーション方法を開発することを目的として研究を行った。

2. トンネル壁面撮影画像の普遍的な特徴

(1) トンネル壁面撮影画像の空間周波数特性

実世界の光学像は空間周波数空間で振幅が空間周波数の逆数に比例するという普遍的特性を有することが知られている^{6) 7)}。白、黒レベルが飽和していないトンネル壁面画像でこの特性が成立していることを確認するため



図-1 トンネル壁面撮影画像 (左:トンネル1, 中:トンネル2 右:トンネル3)

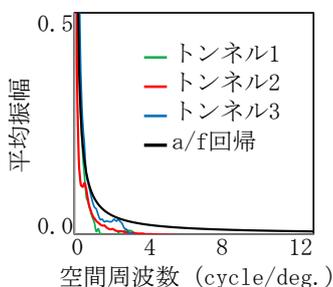


図-2 トンネル壁面の空間周波数特性

に、図-1に例示するトンネル壁面を撮影した画像の空間周波数 (f) に対する平均振幅を図-2 にプロットした。図-2の太線は各画像の空間周波数特性を a/f で回帰した曲線である (a : 回帰係数)。回帰と各画像の空間周波数特性は高い一致を示し、トンネル壁面においても振幅が空間周波数の逆数に略比例するという普遍的な特性が維持されることが確認された。

(2) トンネル壁面撮影画像の輝度ヒストグラム特性

トンネル撮影画像のヒストグラムの一般的な特性の確認を行った。図-3から図-5の青い棒グラフは、図-1の各トンネル壁面撮影画像の輝度 (画素値) の度数ヒストグラムで、赤の曲線は各ヒストグラムのガウス関数回帰曲線である。各ガウス関数回帰の平均値 m と標準偏差 σ の値を表-1に示す。いずれも精度良く近似できており、トンネル壁面撮影画像の画素値ヒストグラムはガウス関数で規定できることが明らかになった。

3. シミュレーション

(1) トンネル壁面のシミュレーション

2章で示した特徴を有するシミュレーション画像を(a)-(d)に示すアルゴリズムで生成した。

- ガウシアンホワイトノイズ画像を生成する (図-6)。
- ステップ(a)の画像をFFT (Fast Fourier Transform) し、 a/f (a : 定数, f : 空間周波数) 変調する。
- 逆FFTを行い、画像を実空間に再変換する。
- ヒストグラムが平均値 m 、標準偏差 σ のガウス関数になるように階調の線形変換を行う。

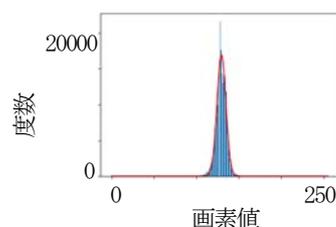


図-3 トンネル壁面撮影画像のヒストグラム (トンネル1)

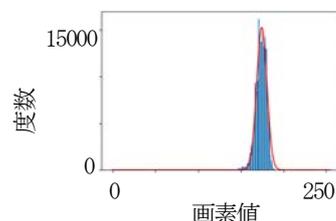


図-4 トンネル壁面撮影画像のヒストグラム (トンネル2)

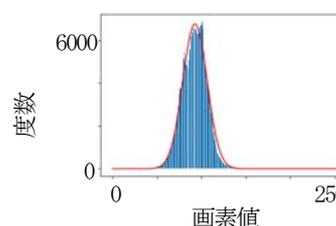


図-5 トンネル壁面撮影画像のヒストグラム (トンネル3)

表-1 各トンネル壁面の画素値の平均値と標準偏差

	トンネル1	トンネル2	トンネル3
平均値 m	129.0	173.8	92.3
標準偏差 σ	6.3	6.3	13.3



図-6 ガウシアンホワイトノイズ画像 (ステップ(a))



図-7 トンネル壁面のシミュレーション画像 (左:トンネル1, 中:トンネル2, 右:トンネル3)

図-7に示す3個の画像は、表-1の3組のパラメータを用いて(a)-(d)で示したアルゴリズムで生成されたトンネル壁面のシミュレーション画像である。図-7と図-1の対応する画像同士を比較すると明らかのように、実際のトンネル壁面の状態に非常に近いシミュレーション画像が得られた。

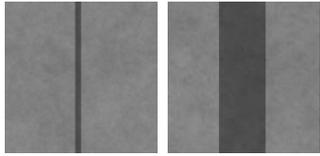


図-8 ひび割れを重畳したトンネル壁面のシミュレーション画像（左）とその拡大図（右）

(2) 変状の重畳

3. (1)のステップ(d)の結果得られる画像に対して変状を重畳する。今回我々は、トンネル点検における重要な対象の一つであるひび割れに限定した。ひび割れはトンネル壁面に開口を有する複雑な三次元形状の亀裂で、幅や内部の状態に応じて反射光量分布にむらが生じる。今回は、ひび割れコントラストと呼ぶ量を定義して、これを用いた (e)-(g)のアルゴリズムでトンネル壁面のシミュレーション画像にむらを有するひび割れを重畳した。

- (e) ひび割れを重畳する画素を決定する。
- (f) ひび割れコントラスト (d %) を決定する。
- (g) 位置(i, j)のひび割れの画素値 $y_{i,j}$ を同じ位置のトンネル壁面シミュレーション画像の画素値 $x_{i,j}$ とひび割れコントラストを用いて以下の式(1)で決定する。

$$y_{i,j} = (1 - d/100) \cdot x_{i,j} \quad (1)$$

図-8の左の画像は、図-7の左の画像に対して、(e)-(g)のアルゴリズムで直線状のひび割れを40%のひび割れコントラストで重畳したシミュレーション画像であり、図-8の右の画像は図-8の左の画像の中心部分の拡大図である。

(3) 撮影系の特性の反映

実際の撮影では、撮影距離、光学結像系、イメージセンサの密度によって解像度が決定され、結像光学系の点像応答関数で表されるぼけが重畳された被写体の光学像がイメージセンサ上に結像する。光学像はイメージセンサの各画素で光電変換され増幅された後、AD変換されてデジタル画像データとなるが、この電子的過程ではノイズが重畳される。これらを考慮し、以下の(h)-(j)に示すアルゴリズムを用いて、3. (2)までに示した壁面とひび割れのシミュレーション画像に対して撮影系の特性を反映する。

- (h) ひび割れが重畳されたトンネル壁面シミュレーション画像を撮影系の解像度に応じて拡大、縮小する。
- (i) 撮影光学系のぼけに対応する点像分布関数 (point spread function, PSF) の畳み込みを行う。
- (j) センサーノイズに対応するSN比 (n dB) のホワイトノイズを重畳する。



図-9 解像度変換後のシミュレーション画像（左）とその拡大図（右）

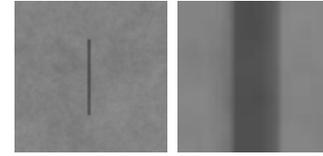


図-10 PSF畳み込み後のシミュレーション画像（左）とその拡大図（右）

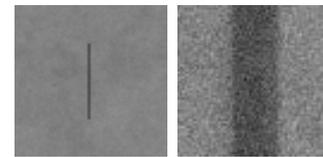


図-11 ノイズ重畳後のシミュレーション画像（左）とその拡大図（右） (SN比: 20dB)

図-9の左の画像は、図-8の左の画像のひび割れの幅と同じ画素数の幅のひび割れを持つひび割れシミュレーション画像の解像度を 1 mm/pixel と仮定して、この画像を 2 mm/pixel に倍率変換した画像である (h)に相当)。

図-10の左の画像は、図-9の左の画像に対してカメラのPSFを畳み込んだもので、実際のカメラの光学結像系のぼけを再現したものである (i)に相当)。

図-11の左の画像は、図-10の左の画像に対して20 dBに相当するノイズを重畳したものである (j)に相当) 。ここではノイズを見やすくするためSN比を比較的低く設定したが、これは照明光量や露光時間が不足して露光量が不十分な場合のシミュレーション例に相当する。なお、図-9、図-10、図-11の右の画像は、それぞれの左の画像の中央部を拡大した画像である

4. 適用例

トンネル点検用撮影画像シミュレーションの実用性を確認するため、ひび割れの自動検出システムを例として検討を行った。撮影工程の解像度、PSF、SN比が既知で、画像解析工程として写真画像からひび割れを自動検出するシステムを想定し、様々な状態のトンネルに対する精度を検証した。解像度は 0.20 mm/pixel 、SN比は30 dBとし、PSFは過去に試作したレンズのPSFを用いた。ひび割れの自動検出には、学習済みのConvolutional Neural Networkを

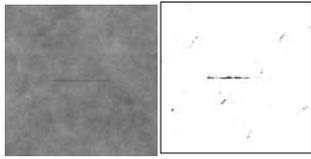


図-12 シミュレーション画像 (左) とその検出結果 (右)

表-2 信号検出理論に基づく応答の分類

		システムの応答	
		ひび割れ	非ひび割れ
正解	ひび割れ	hit	miss
	非ひび割れ	false alarm (FA)	correct rejection (CR)

用いて画像中のひび割れの画素を判別するものを使用し、トンネル壁面と変状の状態を表すパラメータである壁面の画素値の平均値と標準偏差、およびひび割れコントラストを変化させて0.2 mmの幅の縦横二方向の直線のひび割れ画像に対するシミュレーションを行った。図-12の左の画像は横方向のひび割れを有するシミュレーション画像例、右の画像はその画像のひび割れを自動検出した結果で、ひび割れと判定された画素を黒、ひび割れでないと判定された画素を白で表している。なお、背景と区別するために図-12の右の画像には黒枠を付与した。ひび割れの検出精度を評価する評価値としては、信号検出理論で用いられる d' を用いた。 d' の値が大きいくほど信号検出力が高いシステムであると判断される。信号検出理論に従って、ひび割れの画素で正しく判別された画素をhit、誤って判別された画素をmiss、ひび割れでない画素で正しく判別された画素をcorrect rejection (CR)、誤って判別された画素をfalse alarm (FA)としてカウントした(表-2)。ひび割れではない全画素数に対するFAの画素数の比をFA率、ひび割れの全画素数に対するhitの画素数の比をhit率として、1からFA率を引いた値をz得点化した値である Z_N と、1からhit率を引いた値をz得点化した値である Z_{SN} を用いて、 d' は以下の式(2)で与えられる。

$$d' = Z_N - Z_{SN} \quad (2)$$

図-13のすべてのグラフの縦軸は d' 、横軸はひび割れコントラスト(%)で、トンネル壁面の画素値の平均値(128, 96, 64)と標準偏差(20, 40, 60)の組み合わせごとに表示され、青と赤の曲線は横方向と縦方向のひび割れに対応している。この例では、撮影画像においてトンネル壁面が暗く撮影された場合、トンネル壁面のむらが大きい場合、ひび割れが薄く撮影された場合に検出精度が低下することがわかる。また、背景が黄色いグラフに対応する範囲であれば、ひび割れの濃さに関係なく良好

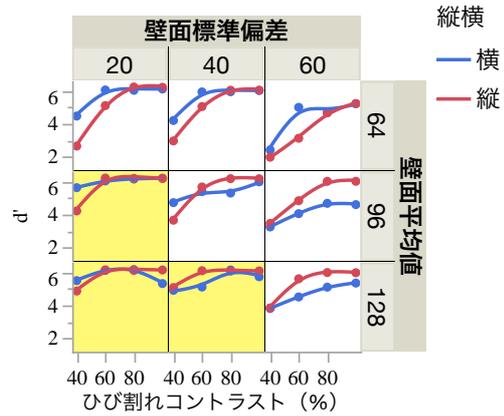


図-13 ひび割れ自動検出システムの検出精度検証結果

な精度でひび割れを検出できることが予想される。このように、今回提案する方法によって設計工程やシステムの運用方法などに対して有用なフィードバックが得られることがわかった。

5. 結論

トンネル壁面とその代表的変状であるひび割れの状態の定量的取り扱い方法と、写真画像によるトンネル点検支援システムの定量的かつ実用的なベンチマークを可能とするトンネル点検用撮影画像のシミュレーション方法を開発した。

参考文献

- 1) 国土交通省：新技術利用のガイドライン(案), 2019.
- 2) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ(案), 2019.
- 3) 山口友之, 橋本周司：パーコレーション処理によるコンクリート表面像のひび割れ検出, Proc. of DIA2008, pp.143-148, 2008.
- 4) 小山哲, 丸屋剛, 堀口賢一, 澤健男：ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol. 68, No. 3, pp.178-194, 2012.
- 5) 鎰谷賢治, 押切幸治, 菊地太郎, 牧野晶, 清野義人, 戸本悟史：マルチスケール二次微分カーネルを用いた写真画像によるコンクリート表面のひび割れ幅測定, 土木学会論文集 F1(トンネル工学), Vol. 74, No. 2, pp. I_30-I_39, 2018.
- 6) Webster, M. A., Werner, J. S., and Field, D. J.: Adaptation and the phenomenology of perception. In fitting the mind to the world: Adaptation and after-effects in high-level vision., *Advances in Visual Cognition Series*, Volume 2, Oxford University Press, 2005.
- 7) Kagitani, K.: Image quality evaluation using generalized natural image., *Proc.SPIE*, Vol.6808, pp: 6808S-1-6808-8, 2008.