

# 画像処理に基づくトンネル内壁の変化検出システム

Image Processing Change Detection System for Automated Monitoring of Visual Changes in Tunnel Linings

リッカルド ゲラルディ

■ Riccardo GHERARDI

サイモン ステント

■ Simon STENT

ビヨン ステンガー

■ Björn STENGER

ロベルト チポラ

■ Roberto CIPOLLA

都市部のトンネルは社会インフラ構造物の一つとして、輸送だけでなく送電や通信などの重要な機能を提供しており、その構造健全性を効率的に監視することは、社会的に重要な課題である。

東芝は、コンクリート製トンネル内壁に発生したひび割れなどの視覚的变化を検出するシステムを開発している。専用の装置で撮影された複数枚の画像からトンネルの3次元モデルを自動的に生成し、新たに撮影した画像を正確に位置合せして、トンネル表面の視覚的变化を検出する。様々な視覚的な特徴を比較し、正規化相互相関 (NCC) に基づいた距離指標が有効であることを確認した。更に、形状に関する知識を導入し、トンネル表面以外の画像を除去することによって、視点や照明の変化に対するロバスト性を向上させた。トンネル内壁に人工的に付加した水漏れや、亀裂、剝離などを用いてこのシステムの有効性を評価した結果、効果的なトンネル内壁の点検ができることを確認した。

Tunnels, which are located in urban areas, provide essential functions, including transportation, electricity distribution, and communication, as a social infrastructure system. Efficient monitoring of the structural soundness of large-scale tunnels has become an issue of critical importance.

As a solution to this issue, Toshiba has been developing an image processing change detection system to automatically monitor visual changes in concrete tunnels. In order to compare images taken at different times, the images are accurately aligned in a three-dimensional (3D) tunnel model that is automatically created from a number of images taken by a dedicated image capture device. By comparing a number of visual features in the images to detect visual changes, this system can specify visual changes in terms of distance based on the normalized cross-correlation (NCC) coefficient. Furthermore, robustness to changes in viewpoint and lighting has been improved through the introduction of geometric knowledge and elimination of images in off-surface areas. Experiments with a prototype image capture device using artificial changes, which were made to a concrete tunnel lining to simulate leaks, cracking, spalling, and other visual changes, have verified that this system is effective for regular tunnel monitoring.

## 1 まえがき

都市部のトンネルは、大規模な社会インフラ構造物の一つであり、人や物資の輸送路を確保するためだけでなく、送電や通信などの社会に不可欠な機能も提供している。トンネルは機能と寿命の両面で当初の設計仕様を超えて利用されることが多く、構造的な破損の発生リスクが高まっている場合があり、トンネルの構造健全性を効率的に監視することは、社会的に重要な課題である。破損による障害を予防するための重要な要件の一つは、トンネル内壁の水漏れや、亀裂、剝離などの視覚的变化を早期に発見することである。早期発見は早期対応を可能にし、補修などのコストを低く抑え、予期せぬ障害のリスクを低減できる。このような視覚的变化の検出は、目視検査によって行われるのが一般的であるが、作業環境は良好とは言えず、検査の対象範囲も広いため、コストと時間が掛かる。市販の検査システムもあるが、まだ高価であり、定期点検は数年に1回程度の頻度でしか実施されていないのが現状である。

このような状況を受けて、東芝は、低コストで高頻度なモニタリングを実現するための第一歩として、画像処理に基づくトン

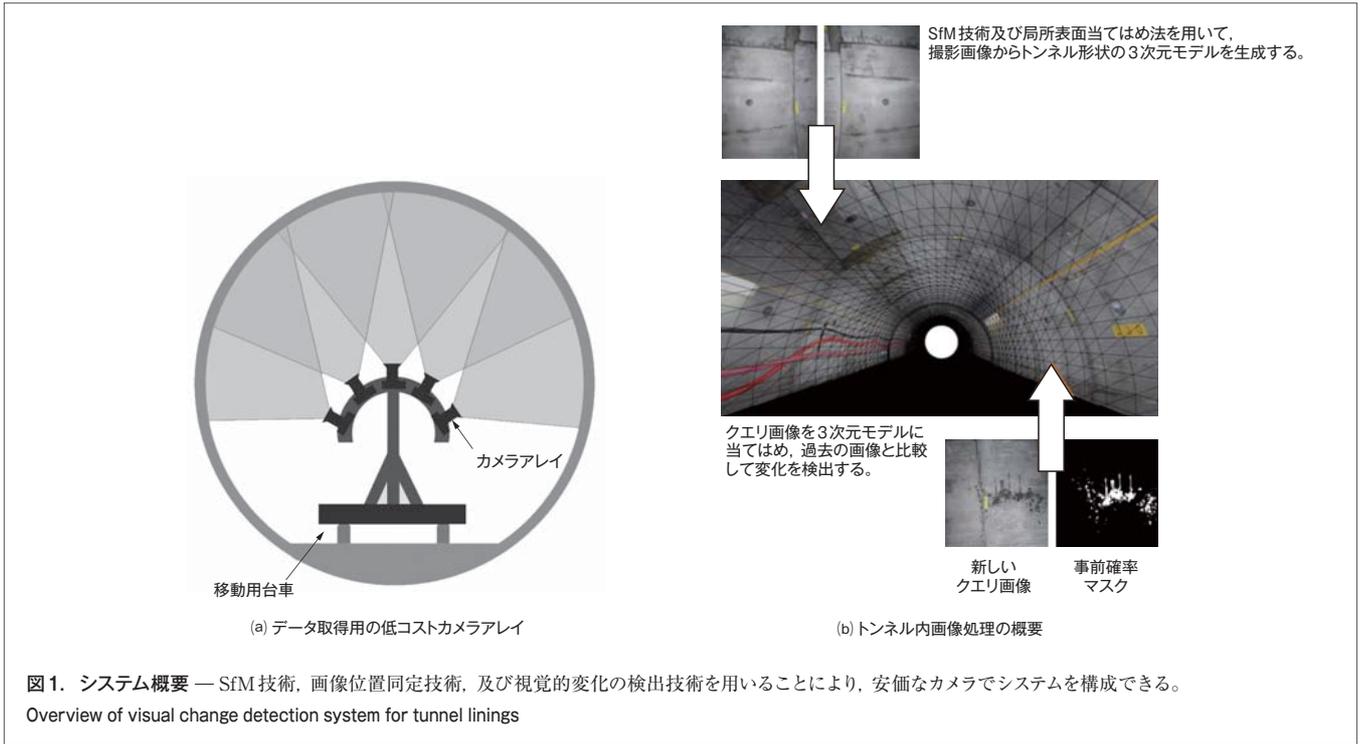
ネル内壁の変化検出システムを開発している (図1)。このシステムは、トンネル内壁表面の変化を自動的に検出しその位置を特定することにより、専門の検査者の作業負荷を軽減し検査効率を向上させることを目指している。またこのシステムは、3次元再構成 (SfM: Structure from Motion) 技術及び画像位置同定技術を活用することで、特殊な撮影装置を必要とせず、既製品の安価なデジタルカメラで運用可能である。

ここでは、試作した変化検出システムの概要、及びそれを支える画像処理技術について述べる。

## 2 変化検出システムの概要

異なる時期に撮影された画像を比較して変化を検出するためには、それらを正確に位置合せする必要がある。これを実現するために、トンネルの形状を以下の手順でモデル化した。

まず、SfM技術を用いて、トンネル内壁の形状を多数の3次元点 (以下、3次元点群と略記) として計測する<sup>(1)</sup>。次に、局所2次曲面をこの3次元点群に当てはめ、その表面の模様を画像から取得して、トンネル形状の3次元モデルを生成する<sup>(2)</sup>。トンネルのコンクリート内壁表面の特徴的な模様を照合することに



より, この3次元モデルと, 同じトンネル表面を異なる日時に撮影した画像を正確に位置合わせすることができる。

過去に撮影されたデータベース画像と, 新規に撮影されたクエリ画像の位置合わせを行った後, クエリ画像の各画素に関する新旧画像間の差を表す距離指標に基づいて変化を検出する。距離指標の選択にあたっては, トンネル内壁そのものの重要な変化は検出できるが, 対象外の変化は検出しないものを選ぶ必要がある。そこで, 平均値を灰色に補正した色度と明度のユークリッド距離で評価する色正規化 (Gray-world) 技術, 色恒常性に基づく色補正 (MSR : Multi-Scale Retinex) 技術<sup>(3)</sup>, 及びテクスチャの類似性を測定する明度のNCCの3種類の距離指標について検討を行った。

その他に考慮すべき事項として, 照明の変化や, トンネル内壁の表面から突出しているケーブルや照明器具などの3次元モデルで表現されていない形状に起因する, 画像上の視覚的な変化がある。これらは, このシステムとしては検出の対象外であり, 変化として検出されないようにする必要がある。

照明の変化に対しては, 単一画像の色正規化及び色恒常性技術の適用を検討した。

トンネル内壁の3次元モデルは局所2次曲面で構成されており, ケーブルなどの内壁表面上にない構造物も, 内壁表面の模様として表現されている。そのため, 3次元モデルを生成するとき用いたデータベース画像とは異なる位置や角度で新たなクエリ画像を撮影し位置合せした場合, この部分で位置ずれが発生して視覚的な変化として検出される。この問題は, 3次元モデルと突起物などの距離に応じて, 検出された視覚的な変

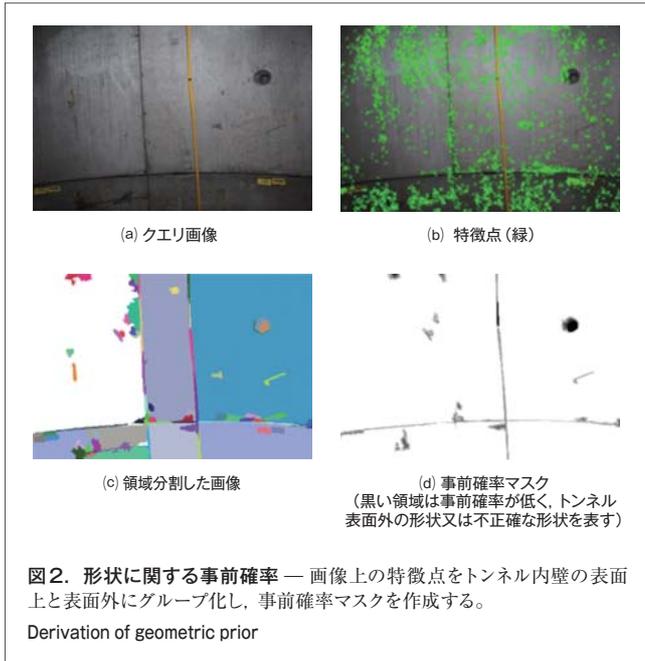
化を除去するマスク処理を行うことで解決できる。このような形状に関する事前知識を事前確率として表現する技術を導入した。

### 3 形状に関する事前確率

形状に関する事前確率は, トンネル内壁の3次元モデルで表現できない形状や, 計測誤差が大きい3次元点によって引き起こされる視覚的な変化などを, マスクすることを目的としている (図2)。

データベース画像中の各特徴点 (図2(b)) は, SfM技術によりその3次元位置が計算されており, トンネル内壁の3次元モデルからの距離が計算できる。初めに, 特徴点を, トンネル内壁の3次元モデルからの距離に応じて, 表面上と表面外にグループ化する。そして, SfM技術で3次元位置が計算されるのは特徴点だけであることを考慮して, 次のように形状に関する事前確率を計算する。

まず, 色に基づく領域分割処理により, クエリ画像を色とテクスチャが類似した領域に分割する (図2(c))。次に, 各領域に含まれる表面上特徴点と表面外特徴点の個数に基づき, 各領域の分類を行う。表面外特徴点だけを含む領域は“表面外”に分類し, 事前確率0を割り当てる。すなわち, これらの領域内の変化は対象外の変化とみなされ, 除去される。一方, 表面外特徴点よりも表面上特徴点を多く含む領域は“表面上”に分類され, 事前確率1を割り当てる。特徴点を含まない, 又は表面外特徴点よりも表面上特徴点が少ない領域内にある画



素については、当該画素にもっとも近い表面上特徴点との距離に応じて事前確率を決定する。このようにして事前確率マスクを作成する (図2(d))。

## 4 評価

フラッシュライトを備え撮影を同期させた5台のカメラを、図1に示すように半円状に配置した画像取得システムを試作し、直径3 m、長さ100 mのトンネル区域について、上方180°のデータベース画像を取得した。このデータベース画像は、解像度3,888×2,592画素の画像1,000枚から成る。次に、コンクリー

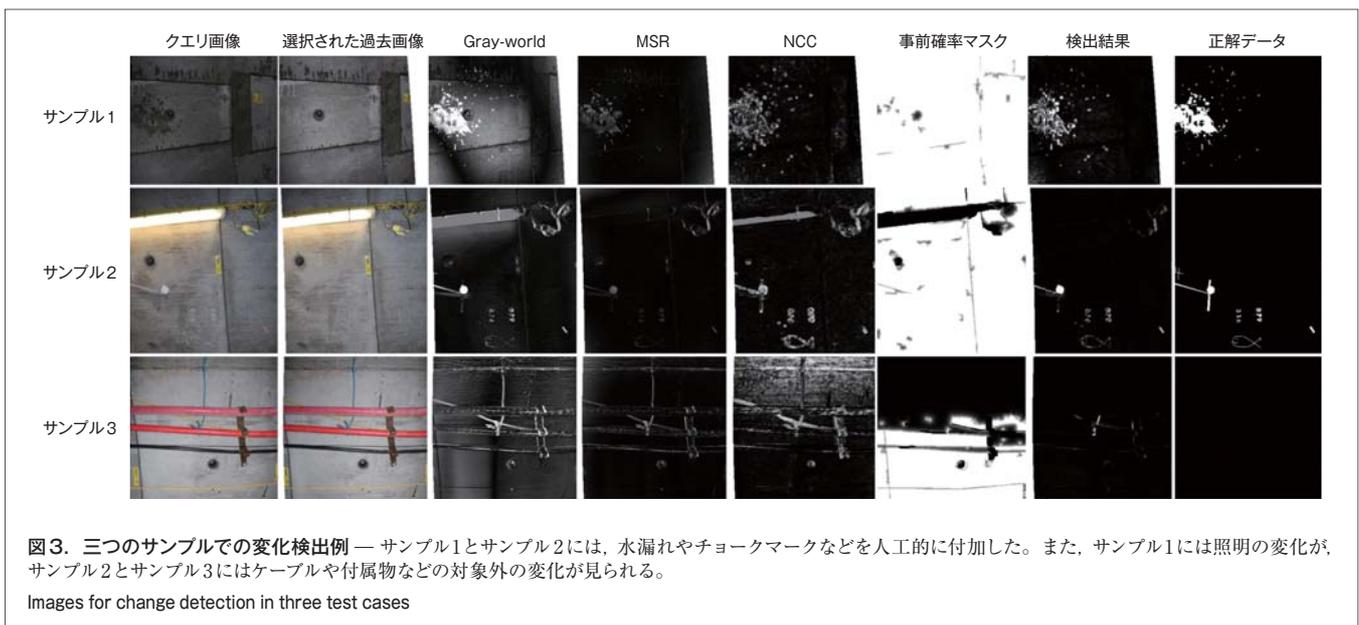
トのトンネル表面に、水漏れや、亀裂、剝離などの視覚的变化を人工的に付加し、232枚のクエリ画像を撮影した。視覚的变化が撮影された131枚には、手作業で画像上の視覚的变化の位置を入力し、正解データを作成した。トンネルのコンクリート内壁表面の様子は特徴的であったため、特徴点周辺の局所画像の照合により、50 m区域内でクエリ画像をデータベース画像と正確に位置合わせすることができた。クエリ画像を3次元モデルの当該箇所のテクスチャと比較することにより、変化検出を行った。

### 4.1 定性評価

3例のクエリ画像について、3種類の距離指標、形状に関する事前確率マスク、最終的な変化検出結果、及び正解データを図3に示す。サンプル1とサンプル2には、水漏れや、チョークで書かれた微細なマーキング、変色、表面に付着した異物などの視覚的な変化があり、サンプル3には視覚的な変化がない。

ここに示したGray-world, MSR, 及びNCCの3種類の距離指標は、異なる検出傾向を示した。Gray-worldは、優れた解像度があり、変化を増幅する傾向があるため、照明の変化も増幅されてしまう。MSRでは、緩やかな低周波数の対象外の変化は除去されるが、高周波数の微細な変化は維持される。ただし、グレースケールの部分では、カラーの部分ほど変化は明瞭ではない。NCCでは、明度と空間情報が考慮されるため、細かい変化も検出できるが、その代償として解像度が低下する。いずれの距離指標でも、照明装置やケーブルに起因する対象外の変化が誤検出された。これはサンプル3でより顕著であり、トンネル表面にないケーブルや鏡面反射が視覚的变化として検出されている。

Gray-world, MSR, 及びNCCによる検出に対して形状に関する事前確率を適用した最終的な検出結果では、三つのサン



ブルのいずれにおいても、表面外の構造が原因となっている対象外の変化の大部分が、形状に関する事前確率により除去されている。サンプル1とサンプル2では、右端に示した正解データに近い検出結果が得られた。一方、サンプル3では変化はないはずだが、通常はあまり特徴のない赤いケーブル上にひもがあったためにこれが誤検出された。

#### 4.2 定量的評価

3種類の距離指標のそれぞれに、形状に関する事前確率を組み合わせ、画像上の検出性能を比較したところ、局所的な空間情報を考慮した距離指標であるNCCは、MSRやGray-worldなどの、隣接するピクセル間の依存性を利用しない方法と比較して、高い検出性能を示した。NCCはあらゆる種類の視覚的な変化の検出において最高の検出性能を示し、ほぼ全ての変化事例を検出し、誤検出率は約50%であった。

#### 4.3 形状に関する事前確率の効果

Gray-worldとNCCについて、形状に関する事前確率を用いた場合と用いなかった場合とで、画像上の検出性能を比較した。いずれの距離指標でも、形状に関する事前確率の導入により検出性能は大幅に向上した。形状に関する事前確率なしでは、Gray-worldのほうがNCCよりも識別力は高い。これはNCCが、Gray-worldと比較して、対象外の変化をより多く検出する傾向があるためである。一方、形状に関する事前確率を導入すると、対象外の変化があった領域がマスクされるため、NCCではトンネル表面だけに局所的な空間情報を安全に適用することが可能になり、Gray-worldを上回る性能が得られた。

## 5 あとがき

平滑で未塗装のトンネル表面コンクリート上に生じた、一般的な視覚的な変化の自動監視及び検出に適したシステムを試作し、それを支える画像処理技術について述べた。

このシステムは実施コストも安価であり、目視検査の作業負荷を大幅に軽減するため、効果的なトンネル点検を高頻度に行うことができる。現在、より大容量のデータを自動的に取得するための画像取得装置を開発中であり、対象外の変化に対してよりロバストな検出手法についても更に検討を進める予定である。

今後は、このシステムの応用範囲をより複雑なトンネル形状にも拡大していきたい。

## 文献

- (1) Snavely, N. et al. Modeling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision*. **80**, 2, 2008, p.189 - 210.
- (2) Chaiyasarn, K. et al. "Image mosaicing via quadric surface estimation with priors for tunnel inspection". 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Cairo, Egypt, 2009-11, IEEE. 2009, p.537 - 540.
- (3) Jobson, D. J. et al. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes. *IEEE Transactions on Image Processing*. **6**, 7, 1997, p.965 - 976.



リッカルド ゲラルディ Riccardo GHERARDI, Ph.D.  
東芝欧州研究所 ケンブリッジ研究所 コンピュータビジョングループ、Ph.D. 3次元再構成、コンピュータビジョン、リアルタイム立体視、コンピュータ支援インフラ検査の研究・開発に従事。IEEE, BMVA会員。  
Toshiba Research Europe Ltd.



サイモン ステント Simon STENT  
ケンブリッジ大学 機械知能研究室 博士後期課程在学中。  
コンピュータビジョン、機械学習応用、ロボティクス、及びコンピュータ支援インフラ検査の研究・開発に従事。IEEE, BMVA会員。  
University of Cambridge



ビヨン ステンガー Björn STENGER, Ph.D.  
東芝欧州研究所 ケンブリッジ研究所 コンピュータビジョングループ責任者、Ph.D. 画像認識技術の研究・開発に従事。  
IEEE, ACM会員。  
Toshiba Research Europe Ltd.



ロベルト チポラ Roberto CIPOLLA, Ph.D.  
東芝欧州研究所 所長、ケンブリッジ大学 工学部教授、Ph.D. コンピュータビジョン、ロボティクスの研究・開発に従事。FREngフェロー、FIETフェロー、BMVAフェロー、IEEE会員。  
Toshiba Research Europe Ltd.

## 和 訳

岡田 隆三 OKADA Ryuzo, Ph.D.

研究開発統括部 研究開発センター インタラクティブメディアラボラトリー研究主幹  
Interactive Media Lab.