

時速 100 km 走行でのトンネル覆工コンクリート 高解像度変状検出手法

高速道路の点検の高度化に向けた高速カメラの活用

早 川 智 彦・石 川 正 俊・亀 岡 弘 之

高速道路を始めとしたインフラの老朽化が進む中、人による点検に加えロボットやセンサを用いた点検やメンテナンスの導入が求められている。開発したモーションブラー補償システムは回転ミラーを用いた光軸制御により、時速 100 km で走行中に 0.2 mm のひび割れを 4K レベルの高解像度で撮像・検出可能である。更に、赤外線サーモカメラによる撮像にも有効であるため、浮きや剥離といった内部変状を観察できる。従来の 5 年に 1 度の詳細点検と比べ、交通規制が不要な走行型の点検車両による高頻度な点検により、安全で強靱なインフラの実現を目指す。本稿では、時速 100 km で移動しながら 0.2 mm のひび割れを撮影可能なシステムの実証実験について紹介する。

キーワード：トンネル、点検、高速カメラ、赤外線サーモカメラ、モーションブラー、ひび割れ、モニタリング、高速道路

1. はじめに

高速道路の総延長は 2019 年度末時点で 9,062 km となり、利用台数とともに年々増加している。人や物の移動を担うインフラであり、安全に長期間使用するために維持・管理の重要性が高まっている。しかしながら道路や橋梁、トンネルの老朽化は進んでおり、そのなかでも高速道路のトンネルのうち約 4 割が供用後 30 年以上経過しようとしている（2018 年度末時点）。国土交通省が提言した『インフラ長寿命化基本計画』ではインフラメンテナンスにセンサやロボットを活用することで、安全性を高める高効率な点検の導入が期待されている。現在は 5 年に一度の近接目視や打音による詳細点検が道路トンネル定期点検要領によって規定されているが、点検のための交通規制や点検員の安全、定量的な評価が困難であった。トンネルの変状は利用者の頭上に発生することから、わずかな変状でも重大な事故に繋がる可能性があり、詳細なモニタリングが求められている。また、日々変化していく劣化・損傷の具合を追跡するために高頻度な点検が可能なシステムの活用が重要である。点検作業による交通規制や渋滞を回避するために、走行型のシステムが有効であり特に高速道路の速度基準に準拠したものであることが望ましい。一方、走行速度や画像の露光時間に応じて、手振れ等の「ぶれ」の一種であるモーションブラーが撮影画像中に発生してしまうため、画質の劣化

が生じてしまうことが問題であった。そこで、従来の走行型のシステムでは、モーションブラーの影響を避けるために高輝度の照明と短い露光時間の撮影によって解決してきたが、高輝度の照明は装置の大型化により特殊車両である必要性が生まれ、わき見運転の誘発の可能性がある。

本稿では、時速 100 km で移動しながら 0.2 mm のひび割れを撮影可能なシステムの実証実験について紹介する。なお、本システムは東京大学と中日本高速道路(株)との共同研究において開発された。

2. モーションブラー補償システム

カメラが移動する状況や移動する対象を撮影する際は、その移動量に応じて画像にぶれが発生する。このぶれをモーションブラーと呼ぶ。身近な例としてシャッターを切る時に手やカメラが動いてしまう「手振れ」が挙げられ、デジタルカメラには「光学的手振れ補正機能」が搭載されており、撮影時の振動や撮影者の動きを補償して撮影される。だがこの技術はあくまで手振れで発生する程度のぶれを対象としており、動きの速度を計測するセンシングスピードも動きを補償する内部のモーターのスピードもそれ以上の動きに対しては不足しており、高速移動時のモーションブラーは補償できない。高速道路の法定最低速度は、時速 50 km となっており、この速度に対応することが

必須であり、また、渋滞による二次災害を防ぐためにも、周囲の車両の走行速度に合わせた走行をするため、一般的な最高走行速度である時速 100 km にも対応することが望ましい。そのため、時速 100 km に準拠した速度で走行中に撮像するためには、新たに高速イメージングを行えるシステムの開発が必須であった。

(1) システム概要

本システムでは、車両の移動速度に応じて高速カメラの前に設置したガルバノミラーを回転させることで、移動によって発生するモーションブラーを補償する。ミラー回転の角速度は、取得した 2 枚の画像の移動距離から推定速度を計算し、その移動速度を打ち消すために必要な制御値を算出し、回転させる。一般的に車両の移動速度を知るためには、車両の車輪に搭載された回転を検出するセンサのパルスが利用されているが、本手法では連続した 2 枚の画像のみ利用するため、ハードウェア構成を減らしたシステムの実現を可能としているだけでなく、例えば車輪の内部圧力の増減や路面状態に伴う摩擦による影響を受けにくい。

1 回の撮影の間は、ミラーが回転し移動する撮影対象を追従し、撮影が終わる度にガルバノミラーの角度はリセットされる。これを高速に繰り返すことによって、高速度で移動しながらモーションブラーが補償された鮮明な画像を撮像することが可能となる。

撮像には高速カメラ (JAI 社 SPARK-12000 M) を使用し 4K レベル (3840 × 1808 ピクセル) のグレイスケール画像を取得する。レンズには焦点距離 200 mm のレンズ (Nikon 社 AF-S NIKKOR 200 mm f/2G ED VR II) を用いる。

装置は通常車両にルーフキャリアバーを利用して搭載可能であり、高速道路の巡回業務で日々走行している巡回車両に搭載し (写真—1) 撮影・点検を行う。装置の重量は 80 kg 以下で、大きさは 800 × 600 ×



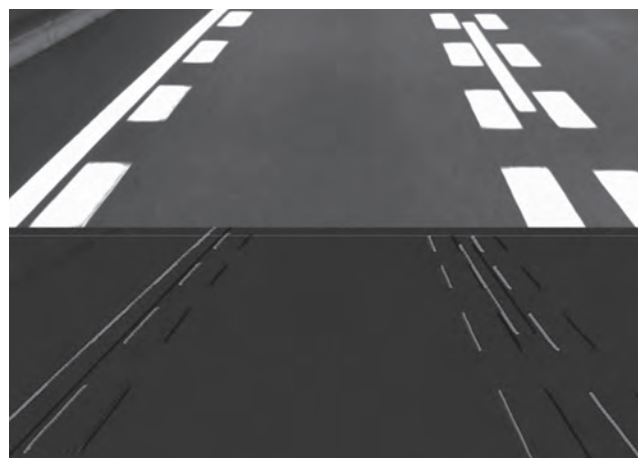
写真—1 装置を搭載した巡回車両

500 mm と小型であり、取り付けの際に特殊な工具は必要ない。電源は車内に搭載する市販のリチウムイオンバッテリーで駆動する。

(2) 白線認識

一度の走行で撮像できる画角は 5 度であるため、走行ごとにサーボモータが撮像角度を切り替え、進行方向へ列状に連続して撮像する。撮像する範囲は白線認識手法により、道路に対する車両の走行位置を自動で推定し、その位置に応じて狙った範囲を帯状に撮影し続ける。

白線認識は、道路を撮像するカメラにより白線画像を取得し、白線の特徴点を抽出する (図—1)。破線や複線を含む白線や汚れで判別しづらい白線にも対応しており、多様な道路の状態においても運用できる。この白線認識手法により、走行中に車線に対して車両の位置が左右に動いた場合であっても、トンネル天井面の狙った箇所を撮影可能となる。そのため運転手は点検撮像中に関わらず通常通りに運転するだけでよく、専用の点検員を必要としないので運用効率が高い。



図—1 (上) 白線認識カメラ撮像画像 (下) 白線認識結果

(3) ひび割れ検出ソフト

システムを利用して撮像を行った後に、モニタリングが必要な変状箇所かどうかを判定するために、ひび割れの検出ソフトを用いる。このソフトは、画像の適応的二値化を行い、画像を走査すると白→黒→白のパターンが線状に検出された箇所をひび割れとし、黒の幅をひび割れ幅として算出した。なお、現状ルールベースのアルゴリズムとなっているが、今後範囲をひび割れ以外に広げることや精度向上を目指し、機械学習等を用いることも検討していく。

(4) サーモカメラによる内部変状検出

トンネルの老朽化による変状はひび割れだけではない。表面からは観察しづらい内部変状であるコンクリートの浮きや剥離も注目すべき点検項目である。高速道路のトンネルという利用者の頭上に存在し、高速で走行する性質上、わずかな剥落でも重大な事故を招く可能性がある。

コンクリートの浮きは目視では診断しづらいため打音や赤外線による点検が有効である。浮きが発生したコンクリートは健全な箇所と比べて温度変化が生じやすい特性があるため、温度分解能の高いサーモカメラを用いることで、内部変状を撮像することができる。内部変状の点検も表面変状のひび割れと同様に、高頻度を実施するために走行型の点検システムが望ましいが、サーモカメラも可視光カメラと同様に移動時にモーションブラーが発生する。そこで可視光カメラを赤外線サーモカメラに置き換えたモーションブラー補償システムを開発した。サーモカメラは日本アビオニクス社の InfReC H9000 を用いた。

3. 実証実験

システムの有効性を確認するため実証実験を実施した。実験では、車線規制されている高速道路及び車線規制されていない高速道路にて通常巡回車両に装置を搭載し、複数回現地試験を行った。

(1) 0.2 mm ひび割れ検出

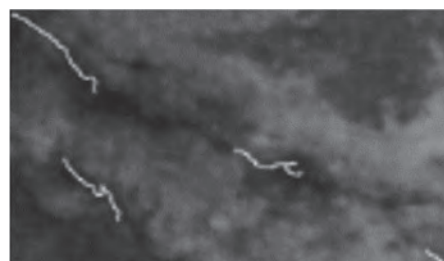
東名高速道路の日本坂トンネルの規制内において時速 100 km で走行し撮像を行った。この際、トンネルの健全度評価で変状とされるひび割れ幅が 0.2 mm 以

上であることから、この数値を検知目標とした。

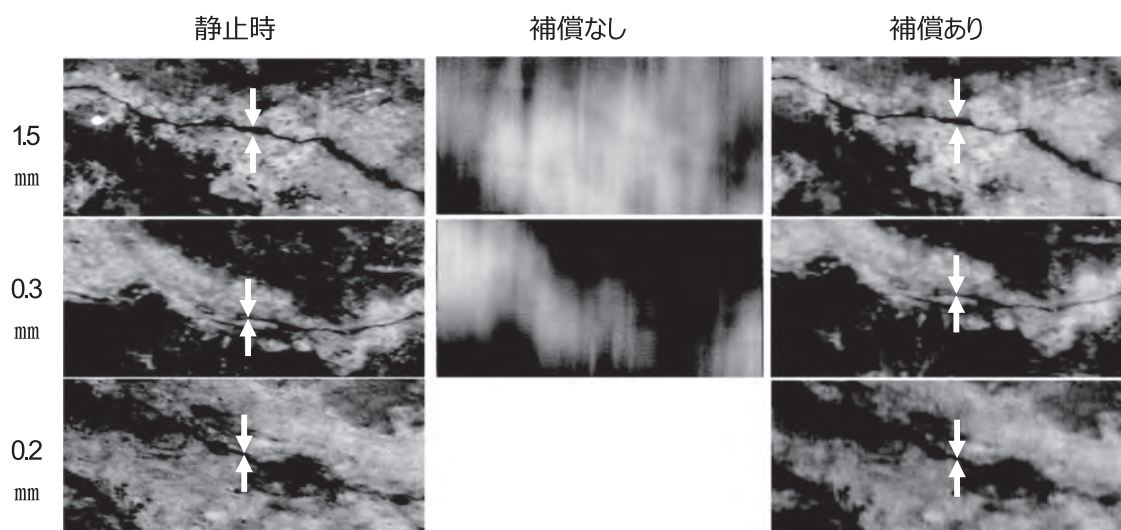
図一2は左側が静止状態、中央が時速 100 km 走行中にモーションブラー補償なしで撮像した画像、右側が時速 100 km 走行中に補償ありで撮像した画像である。補償なしの画像はモーションブラーが多量に発生し、ひび割れを観察することは困難である。補償ありのものは、静止状態で撮像したものと比較したところ、遜色なく鮮明であり、ひび割れを確認することができる。また、図一3よりモーションブラー補償を使用して 0.2 mm のひび割れを不完全ながらも検出できたことから、本システムが高速道路での点検に有効であることを示した。ひび割れ検出ソフトについては、2章でも記したように、今後精度の改善を図る予定である。なお、天井部が排気ガスやすすで汚れており肉眼では変状が観察しにくい箇所であっても問題なくひび割れを検出できたことから、より定量的な評価が期待され、変状検出の品質保証向上への寄与を見込める。

(2) トンネル全周図の作成

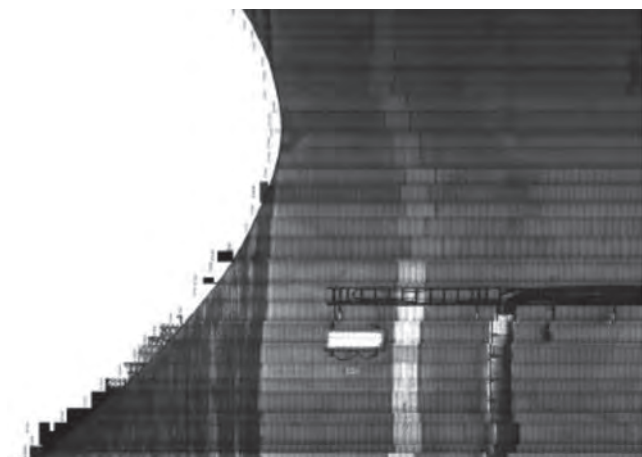
東海環状自動車道の鞍ヶ池トンネルにおいて時速 100 km にて走行し、モーションブラー補償システム



図一3 東名高速道路 日本坂トンネル(時速 100 km)での 0.2 mm のひび割れの検出結果



図一2 東名高速道路 日本坂トンネル(時速 100 km)での撮像結果

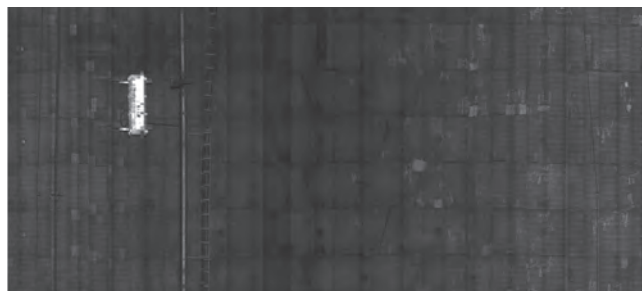


図—4 東海環状自動車道 鞍ヶ池トンネル坑口付近の全周画像

によってトンネル全周の撮影を実施した。この実験から高速カメラと白線認識により、もれなく撮像可能なことを確認した。また、実験は車両規制されてない環境下で行ったため、高速道路の速度に準拠した走行型の点検システムの要求仕様を満たしている（図—4）。

図—4ではトンネルの坑口付近の図となっているが、全周囲に渡って撮影できることがわかった。なお、この実験の時点では画像貼り合わせソフトが完成しておらず、手動で行ったため、各画像間の境目が目立つ結果となった。

次に、鞍ヶ池トンネルだけでなく、他のトンネルにおける本システムの有効性を検証するため、東海北陸



図—5 東海北陸自動車道 飛騨トンネル全周画像

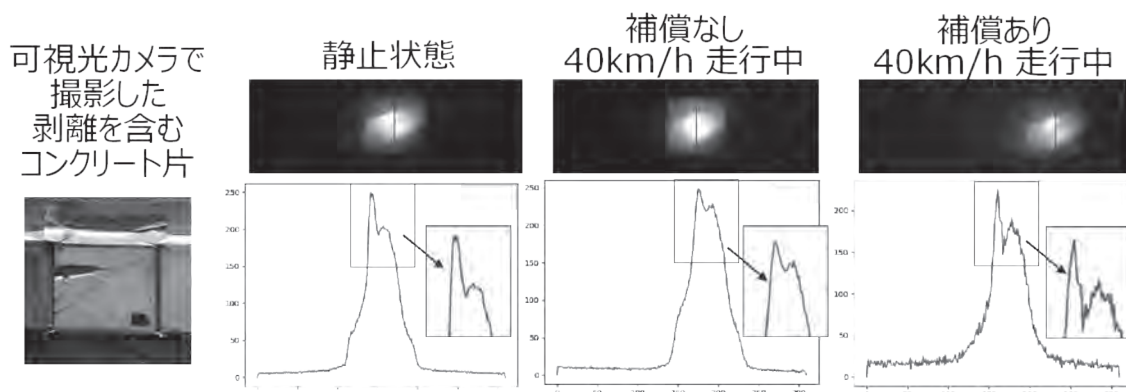
自動車道の飛騨トンネルにおける現地実験を行った。なお、飛騨トンネルでは規制速度である時速 70 km にて走行した。特に飛騨トンネルで撮像を行った領域は RC ライナー区間であるため、通常変状が生じないものとされる。そのため、微細な変化を高頻度で検出可能とする本システムの用途に向いている。現地試験の結果、トンネル全周の展開図を作成した（図—5）。なお、この際には画像貼り合わせソフトを利用したため、鞍ヶ池トンネルの展開図と比べ、各画像間の境目が目立たない結果が得られた。

(3) サーモカメラによる内部変状検出実験

内部変状の検出に関する実験は施工技術総合研究所の模擬トンネルにて実施した。模擬トンネルに浮きや剥離を模造したコンクリートサンプルを貼り付け、時速 40 km にて走行し撮像した。撮像に使用したコンクリートサンプルの可視光画像とサーモカメラで撮像した結果を図—6に示す。モーションブラー補償を使用しない状態では、剥離がある箇所が判別できない。一方で、補償ありでは剥離した箇所の温度の違いが撮像され、内部変状が発生していることを確認できた。これによりモーションブラー補償システムがサーモカメラにも適用可能であり、ひび割れ等の表面の変状だけでなく、覆工コンクリート内の浮きや剥離が撮像可能であることを示した。

4. 今後の運用想定シーン

ここでは開発したシステムの実際の運用シーンについて述べる。巡回車両に搭載されたシステムが日常業務のために走行している状況を想定する。この際、専用の車両や点検員は不要であり、高速道路の速度規定に準拠した速度で一般車両とともに走行する。



図—6 サーモカメラによる走行中（時速 40 km）での剥離の撮影結果（〔早川智彦，久保田祐貴，望戸雄史，柯毓珊，石川正俊：モーションブラー補償による高速撮像技術のインフラ検査への応用，光学，Vol.50，No.2，pp.61-67（2021）〕より転載）

(1) トンネル全周の撮像

システムの撮像画角が5度であるため、一回の走行で幅50cmの範囲が撮影可能である。撮像範囲の誤差を10cmとすると、4度毎に画角の切り替えをすることで漏れなく全周の撮像を行うことができる。システムで撮像可能な範囲である150度は、約38回の走行でトンネル全周の撮像が完了し、各走行後の撮影画像間の共通部の画像特徴量による貼り合わせを行うことで、トンネルの展開図が作成される。トンネル全周の撮像には従来交通規制が必要であったが、本システムにより全周図の取得が従来よりも容易になり、高頻度の実施できる。

(2) 局所モニタリング利用

トンネルのひび割れは、工法にもよるが天端部に発生しやすい。変状の種類によっては早急な補修は必要ないが、劣化が進行した際に速やかに補修する場合がある。そういった変状は走行型点検車両が重点的に撮像することで高頻度なモニタリングが可能となる。

変状を高頻度で撮像し、必要に応じて補修を行うことで、安全性の向上とコストの削減になり、ひいてはトンネルの長命化へ繋がる。いずれの運用状況においても、巡回車両は日常業務のために複数回走行しているため、業務の増加を招くことがない。

5. おわりに

インフラの老朽化が避けられないなかで、安全性を確保し低コストで運用するために、点検にセンサやロボットの導入が進められている。また、高速道路は人

の移動や物流に欠かせない重要なインフラであるため、点検や修繕のために大規模な交通規制を行うことは経済的な損失へ繋がる。コストや安全性の観点から、健全性や性能に不具合が生じてから大規模な修繕を行うよりも、変状が軽微な段階で予防的に修繕を行う方が望ましい。そのため、本研究では光学的にモーションブラーを補償する手法を利用することで、高頻度で安全に点検を実施可能な走行型のモニタリングシステムを提案した。複数回の実証実験を通じて、本システムが高速道路のトンネルにおいて変状検出に有効であることを確認した。今後人による点検に加え、システムによる点検を高頻度を実施することによって、従来の5年に一度の詳細点検とあわせて、より安全性の向上に寄与できると考えられる。

JICMA

【筆者紹介】

早川 智彦（はやかわ ともひこ）
東京大学 情報基盤センター
特任准教授



石川 正俊（いしかわ まさとし）
東京大学 情報基盤センター
特任教授



亀岡 弘之（かめおか ひろゆき）
中日本高速道路㈱
技術本部 高度技術推進部
専門主幹

