

高速走行時におけるモーショントラッキングに基づくトンネル覆工浮き・剥離検査システム

東京大学 正会員 ○早川 智彦, 学生会員 久保田 祐貴
 非会員 望戸 雄史, 非会員 蛭間 友香
 非会員 栃岡 陽麻里, 非会員 石川 正俊

1. はじめに 高速道路のトンネル覆工内部状態を観測するため、赤外線サーモグラフィ法（赤外線法）による浮き・剥離検出手法が用いられている。既存の内部状態観測手法である打音点検と異なり、非接触で点検可能なことから安全面やコスト面で期待され、実用化が進んでいる¹⁾。一方、静止状態での点検では交通インフラを規制することが要件となってしまう、二次災害を引き起こす可能性があった。点検の効率を上げるため、高速に移動しながら点検を行うことが考えられるが、通常の可視光カメラを用いて対象を撮像する場合、移動体やインフラ自体に強力な照明が搭載されていれば、露光時間を短くすることでモーショントラッキングの影響が低い画像を撮影することが可能である一方、赤外線法では事前にキャリブレーションを行うことで取得されるデータと温度値の対応付を行うため、露光時間を可変とすることが困難である。そのため、高速に移動しながら撮影するとモーショントラッキングが生じ、空間解像度が低下することにより正確に変状を測定できない問題点があった。そこで、本研究ではガルバノミラーを用いて移動を補償する回転動作を光軸上に設けることで、静止時と遜色ない画質でサーモカメラによる撮影及び、走行実験によるシステムの検証を行う。

2. ガルバノミラーによるモーショントラッキング補償 モーショントラッキングを補償するため、これまで筆者らが可視光向けのカメラに用いてきたモーショントラッキング補償機構²⁾を応用し、本研究ではサーモカメラの前に取り付けられたガルバノミラーの角速度 ω_m を車両の走行速度に合わせて設定し、図1のように制御を行う。

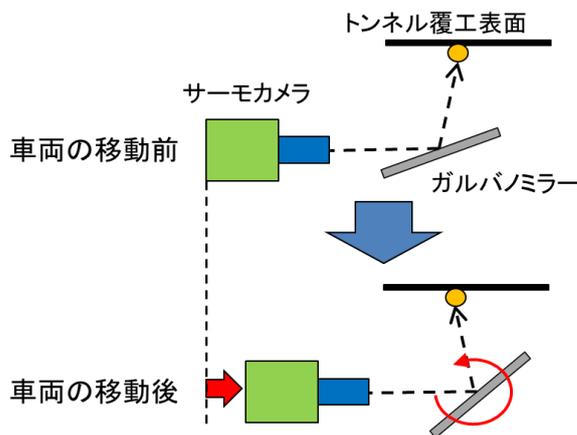


図1 モーショントラッキング補償の原理 図2 実験用トンネルにてモーショントラッキング補償装置及びサーモカメラを搭載した車両

ここで、カメラと対象との距離が、カメラの視野によって決まる撮像画像の最大幅 $width$ に対し長ければ長いほど近似しやすくなるが、車両からトンネル覆工表面の撮像を想定しているため、十分長い距離であり、近似しやすい状況といえる。ガルバノミラーが対象をトラッキングし、カメラが露光している間は一定の下記の式で得られる角速度 ω_m でガルバノミラーが回転動作を行う。

$$\omega_m = 2 \tan^{-1} \left(\frac{x_d}{width} \tan \frac{\alpha}{2} \right)$$

このとき、 x_d は連続した画像間のピクセルのずれ量、 α は画角を表す。なお、角速度と車両の移動速度が露光時間の間で等しければ、カメラから見た視線は常に同一位置に留まることとなり、撮像される画像にはモーショントラッキングが含まれない。カメラが露光を終えたあとは、ガルバノミラーによる追従動作を継続する必要がなく、次の対象へと視線を更新するため、これまでと反対方向へとガルバノミラーの回転方向を切り替え、連続的に対象を切り替えることで覆工表面の画角に収まる一列を撮像可能である。

本手法によってサーモカメラを利用したモーショントラッキング補償装置を開発し、トヨタ社ランドクルーザープラドに搭載した様子を図2に示す。撮像装置の光軸は図1のようにミラーを介してトンネル覆工表面を向いているため、撮影対象のコンクリート片を走行しながら撮影することが可能となる。

キーワード 赤外線法, モーショントラッキング補償, ガルバノミラー, 構造物点検, アクティブ・センシング
 連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL 03-5841-0224 FAX 03-5841-6952

3. トンネル内での走行実験とその結果 車両走行中、赤外線法により剥離を含む100mm四方、厚さ10mmのコンクリートサンプルの変状を計測できるか確認するため、静岡県富士市 施工技術総合研究所内の模擬トンネルにて走行・撮像実験を行った。この際、対象となるサンプルの剥離を顕在化するため、アクティブ・センシング法によるレーザー加熱を行った。あわせて、加熱を必要とせずに温度変化した様子を示す幅38mmの導電性銅箔テープについても、サンプルとしてトンネル覆工表面に貼り付け、実験を行った。サーモカメラは日本アビオニクス社の InfReC H9000、ガルバノミラーはケンブリッジテクノロジー社 M3s を用いた。また、車両のサーモカメラからトンネル覆工表面までの距離は5,000mmであった。

時速40kmで車両走行中にサーモカメラで撮影した画像を図3(c), (d), (g), (h)に示す。補償なしの図3(d)と比べて補償ありの(c)の方が銅箔テープの太さが細く、鮮明になっており、補償なしの図3(h)と比べて補償ありの(g)の方が剥離を示す斜めの境界線が見やすく映っており、変状の様子について容易に確認できるといえる。一方、補償ありの図3(c), (g)は静止状態で撮影した図3(b), (f)と比べてモーションブラーを含んだ画像となってしまうこともわかった。今回設定したガルバノミラーの制御値が正確ではなかった可能性が考えられるため、事前のキャリブレーションや、走行中のフィードバックによる制御機構の開発を進める必要があると考えられる。

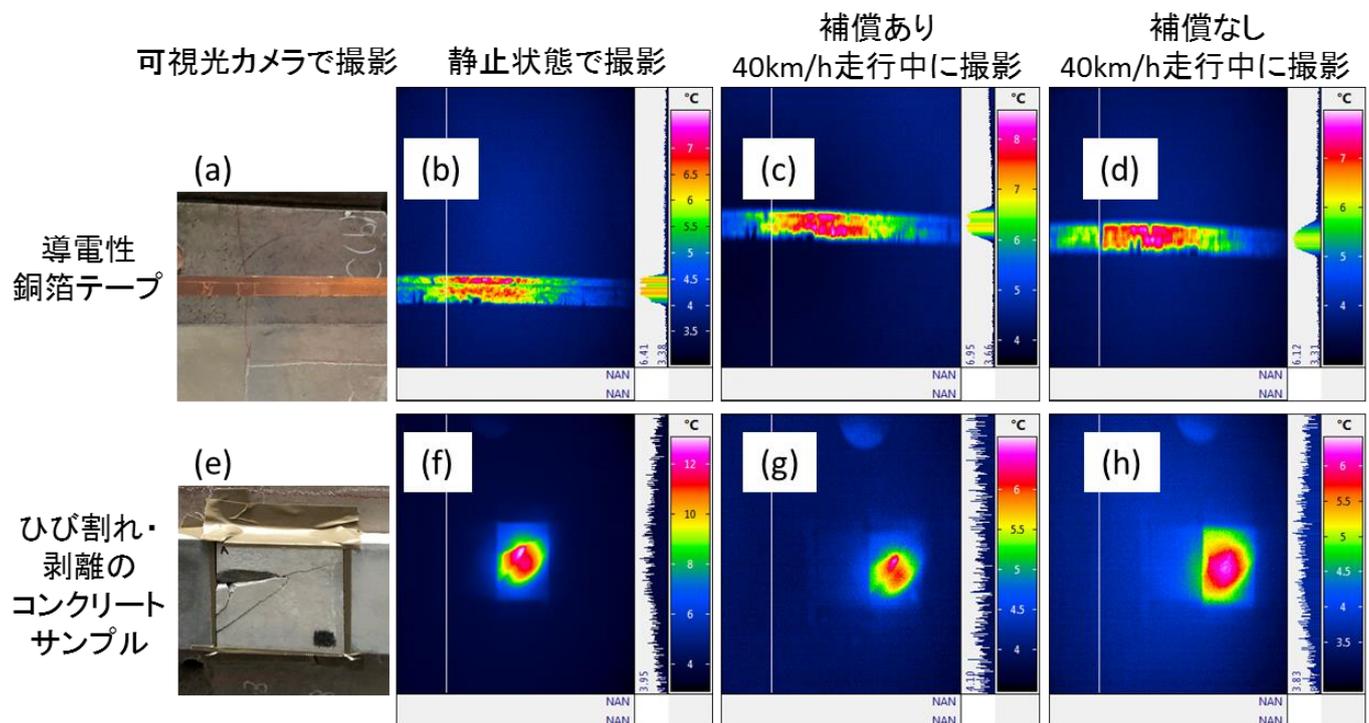


図3 時速40km走行中における可視光カメラ・サーモカメラで導電性銅箔テープ及びひび割れ・剥離を含むコンクリートサンプルを撮像した様子

4. おわりに 本研究では、コンクリート構造物の浮きや剥離を検出するために、サーモカメラ及びガルバノミラーによるモーションブラー補償機構を用いることによって、高速中でもモーションブラーを補償しながら撮像できる手法を提案した。自然環境において特に冬など温度変化の乏しい状況ではモーションブラーによる精度劣化が生じる可能性が高いことから、パッシブ・センシングやアクティブ・センシングに関わらず、本手法を用いて高精度な浮き・剥離検出システムを実現できると考えられる。今回は実験場所の都合上時速40kmまでしか実験できなかったが、今後は実際の高速道路で時速100kmでの走行実験をできるよう、システムの改善に取り組みたい。

【参考文献】1) 永易 慎二, 橋本 和明, 松田 靖博: 赤外線調査トータルサポートシステム“Jシステム”, 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.9, pp.583-584, 2016. 2) Tomohiko Hayakawa, Takatoshin Watanabe, and Masatoshi Ishikawa: Real-time high-speed motion blur compensation system based on back-and-forth motion control of galvanometer mirror, Opt. Express, Vol.23, No.25, pp. 31648-31661, 2015.