

(67) 斜張橋ケーブル点検ロボットにおける画像結合 のための時間同期に関する研究

鄭 巍¹・河村 圭²・藤井 猛³・中村 隆史⁴・塩崎 正人⁵

¹非会員 山口大学 工学部知能情報工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: zw17772413780@outlook.com

²正会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科電気電子情報系専攻

(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: kay@yamaguchi-u.ac.jp

³非会員 山口大学大学院 創成科学研究科電気電子情報系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: a096vgu@yamaguchi-u.ac.jp

⁴正会員 三井住友建設株式会社 技術本部デジタルコンストラクション推進部

(〒104-0051 東京都中央区佃 2-1-6)

E-mail: t-nakamura@smcon.co.jp

⁵正会員 三井住友建設株式会社 技術本部デジタルコンストラクション推進部

(〒104-0051 東京都中央区佃 2-1-6)

E-mail: MasandoShiozaki@smcon.co.jp

筆者らは、斜張橋の斜材点検の効率化を図るため、斜材点検ロボットの開発を進めている。本点検ロボットは、一度の昇降でロボット内に搭載された 6 台のカメラで、斜材表面全周を撮影し、撮影した動画から画像展開図を作成することを特徴としている。本稿では、各カメラで撮影された動画の展開図作成処理の開始時間を同期させるための目印として、斜材点検ロボット内部の緑色基盤上に赤色 LED を設置し、撮影画像から赤色 LED の点灯を検出することで時間同期を実現する手法を提案する。さらに、実際に斜材を撮影した動画からの赤色 LED の点灯検出精度の結果を示す。

Key Words: cable-stayed bridges, robot, image processing, camshift, inspection, time synchronization

1. はじめに

斜張橋は、2019 年 3 月現在、国内で 318 橋¹⁾が建設されており、その維持管理の必要性が高まっている。斜張橋のケーブル点検は、高所作業車を用いた目視点検、または特殊高所技術による目視点検によって行われている。しかし、これらの点検方法には、点検可能な高さに限界があることや、点検者にとって危険な高所で作業を行わなければならないといった問題がある。

そのため、日本国内でも斜張橋ケーブル点検ロボットに関する研究が行われている。既存研究として、VESPINAE²⁾やコロコロチェッカー³⁾などが存在し、著者らも斜材点検ロボットの開発を以前から進めている⁴⁾。本点検ロボットは、一度の昇降で斜材表面全周を複数台のカメラで撮影し、撮影した動画から画像展開図を作成することを特徴とする。画像展開図を作成することで、動画だけでは把握が難しい損傷の位置と形状を簡単に確

認することができる。しかしながら、6 台のカメラの撮影開始を手動で行っており、各カメラの撮影開始から展開図作成処理の開始時間が異なるため、手動による各カメラの同期が必要であった。

本研究では、展開図作成の自動化を最終目的とし、各カメラの同期を自動的に行う手法を検討した。具体的には、点検ロボット内に設置した複数の赤色 LED を同期して点滅させ、これを各カメラで撮影することで、点滅中は斜張橋ケーブル点検ロボットの展開図作成処理範囲内であることを確認できるようにした。さらに、撮影画像から赤色 LED の最初の点灯を自動検出し、各カメラの撮影画像の同期を図った。画像全体から赤色 LED のみを検出する場合、赤色 LED と色情報が類似する画素が原因となり、誤った同期を行う可能性がある。そのため、本研究では、類似画素の少ない緑色基盤を検出した後に赤色 LED の点灯を検出する手法を提案した。なお、緑色基盤の自動検出には Camshift⁵⁾を利用した。さらに本

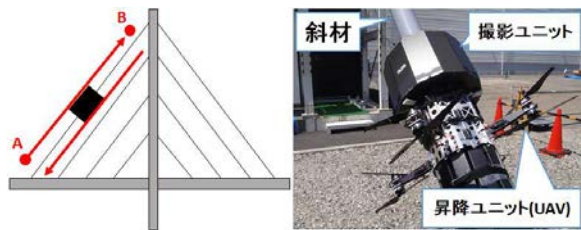


図-1 斜張橋イメージ図と斜材点検ロボットの外観

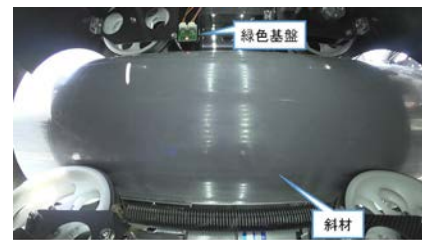


図-2 斜材点検ロボットの内部

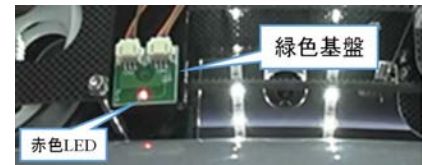


図-3 綠色基盤拡大図

稿では、赤色 LED の点滅開始を検出する手法を提案するとともに、実際の動画に本手法を適用し、赤色 LED 検出可能かを検証した。

2. 斜材点検ロボットによる点検手法

本章では、本研究で使用する斜材点検ロボットについて説明する。斜材点検ロボットによる点検方法は、斜材表面をロボットにより撮影し、その動画から作成された画像展開図を作成することにより行われる。斜張橋全体のイメージ図と斜材に取り付けた状態の斜材点検ロボットの外観を図-1 に示す。図-1 の A 地点にて、手動で撮影を開始し、B 地点まで点検ロボットを上昇させた後に赤色 LED の点滅を開始させ、A 地点まで降下させる。

(1) 斜材点検ロボットの構成

斜材点検ロボットは大きく分けて、撮影ユニット、昇降ユニット (UAV)、画像展開図作成ソフトの3つで構成されている。撮影ユニットの内部には、一度の昇降で斜材表面全周を撮影できるように、カメラが6台搭載されている。また、撮影ユニットには、撮影する際の移動速度を自動で一定に保つための等速降下機構と、撮影ユニットが斜材延長方向に移動した距離 (mm) および斜材円周方向に回転した角度 (°) を記録する移動量計測装置が搭載されている。移動量計測装置によって記録された移動量は、画像展開図を作成するために利用される。

(2) 画像展開図の作成

以下では、画像展開図作成ソフトにおける処理手順を6つのSTEPに分けて解説する。

STEP1 (キャプチャ) : 撮影ユニットにより撮影した動画ファイルを、1 フレームごとに分割し、キャプチャ画像を png 形式で生成する。

STEP2 (レンズ歪み補正) : STEP1 で生成したすべてのキャプチャ画像に対してレンズ歪み補正を行う。

STEP3 (トリミング) : STEP2 でレンズ歪み補正を行った画像から、斜材が投影されている領域を切り取る。切り取り範囲は、1 枚目のキャプチャ画像のみ指定し、2 枚目以降も同様の範囲で切り取る。

STEP4 (平面化) : STEP3 で切り取った画像に、斜材表面を平面化する画像変換式⁴⁾を適用する。

STEP5 (キャプチャ画像結合) : 撮影の際に記録した撮影ユニットの移動量データを利用して、STEP4 で作成した画像を結合する。本 STEP で作成される結合画像は、カメラ1台が撮影した連結画像である。

STEP6 (カメラ間の画像結合) : 撮影ユニットに搭載されたカメラは6台あるため、STEP5 で作成したカメラ1台分の連結画像をさらに結合することで、斜材表面全周を写した画像展開図が完成する。

(3) LED 検出の必要性

斜材点検ロボットには全部で6台のカメラが設置されている。STEP5 の展開図作成処理では、各カメラの展開図作成処理の開始時間を同期させる必要がある。そのため、斜材点検ロボットの内部に赤色 LED を含む綠色基盤をすべてのカメラから撮影できる場所に設置した (図-2、図-3)。この赤色 LED を同時に点灯させ、展開図作成処理の開始時間を同期させるための目印とした。そのため、展開図作成処理の開始時間を把握するためには、赤色 LED が点滅し始めた時のフレーム番号を正確に得る必要がある。従来の手法は、目視により赤色 LED が点滅し始めた際のフレーム番号を得ていたが、画像展開図作成の作業を効率化するためには、赤色 LED が点滅し始めた初期フレームの番号を正確に得る作業の自動化を実現する必要がある。

3. LED 検出方法

本章では、斜張橋ケーブル点検ロボットを用いて撮影した動画から赤色 LED の点灯を検出する手法について説明する。

(1) 検出方法

斜張橋ケーブル点検ロボットは、緑色基盤上の赤色 LED が同時に点灯する様子を検出することで、6 台あるカメラの展開図作成処理の開始時間を統一させた。しかし、キャプチャ画像全体から赤色 LED の点灯を自動的に検出する場合、内部照明や外光等の赤色 LED と色情報が類似した画素が原因で誤検出が発生する可能性がある。そのため本研究では、撮影画像内で類似画素の少ない緑色基盤を検出した後に、緑色基盤周辺の赤色 LED の点灯を検出することで、誤った同期を行う可能性を減少させた。検出手法については次節にて説明する。

(2) 検出のフロー

赤色 LED 点灯検出アルゴリズムの処理手順を 4 つの STEP に分けて解説する。赤色 LED の点灯検出は 6 台のカメラごとに行う。

STEP1：動画を 1 フレーム毎に読み込む。

STEP2：以下の式(1)に従って STEP1 で読み込んだ画像を二値化し、緑色基盤候補を白とする二値画像を取得する。

$$I(x,y) = \begin{cases} 255, & (35,43,46) \leq h(x,y) \leq (77,255,255) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、座標 (x,y) における画素値を $I(x,y)$ 、HSV 値を $h(x,y)$ と示す。HSV 値は、同じ座標の RGB 値から算出する。HSV 値の範囲に、緑色基盤候補とそれ以外を分離するための閾値を設け、その範囲内であれば画素値を 255（白）、HSV 値が範囲外であった場合は 0（黒）とする二値画像を作成する。

STEP3：STEP2 で得られた二値画像に対して Camshift 処理を行うことで、緑色基盤が含まれる矩形枠情報を取得する。矩形枠情報は、矩形の左上座標と縦横幅の情報である。Camshift 処理については、次節にて説明する。

STEP4：以下の式(2)に従って STEP3 で取得した座標内で、赤色 LED の点灯を検出する。

$$I(x,y) = \begin{cases} 255, & (0,43,46) \leq h(x,y) \leq (10,255,255) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

STEP2 と同様に HSV 値の範囲に、赤色 LED の点灯とそれ以外を分離するための閾値を設け、その範囲内であれば画素値を 255（白）、HSV 値が範囲外であった場合は 0（黒）とする二値画像を作成する。そして、STEP3 で得られた矩形枠内で画素値が 255 の画素が存在した場合は、赤色 LED が点灯したと判断し STEP5 に進む。一方で、存在しない場合は STEP1 に戻る。

STEP5：赤色 LED が点灯した際のフレーム番号を取得し、プログラムを終了する。

(3) Camshift

Camshift とは、MeanShift⁹⁾を利用して、一連の動画を処理することで、動画内の着目画素の密度が高い箇所を追跡する手法である。Camshift の基本的な考え方は、動画のすべてのフレームに MeanShift 演算を行い、前のフレームの結果を次のフレームの MeanShift アルゴリズムの探索枠の初期値として反映させることである。Camshift と Meanshift の違いとして、Camshift は探索枠の縦横幅が可変である点が挙げられる。Camshift の処理手順を以下に示す。

STEP1：探索枠の大きさと探索初期点の位置を設定する。

STEP2：STEP1 で設定した探索枠内の着目画素の重心を以下の式(3),(4),(5)で計算する。

$$M_{00} = \sum_x \sum_y I(x,y) \quad (3)$$

$$M_{10} = \sum_x \sum_y xI(x,y), M_{01} = \sum_x \sum_y yI(x,y) \quad (4)$$

$$x_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}, y_c = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (5)$$

ここで、 $I(x,y)$ は座標 (x,y) における画素値である。座標 (x_c, y_c) は重心座標である。なお、探索枠内に着目画素が存在しない場合は、探索枠を拡大し、STEP2 を繰り返す。

STEP3：STEP2 で計算した重心を次回の探索枠の中心とし、新たな探索枠の大きさと位置を決定する。

STEP4：探索枠の中心が「収束」するまで、すなわち探索枠の中心の移動距離が閾値より小さいか、または反復回数が設定値に達するまで、STEP2 と STEP3 を繰り返す。なお、本実験の反復回数は 20 回、中心移動閾値は 1(pixel)とした。

4. 実験検証

本章は、3 章で説明した提案手法を実際の撮影画像に適用し、赤色 LED 点灯が検出できるかを検証した。

(1) 実験方法

本実験は、斜材を模した試験体の撮影画像を用いた。なお、本実験で使用した動画のフレームレートは、全て 30 (fps)、画像サイズは 1280×720 (pixel) である。実際の撮影画像と各探索初期点の対応位置を図-4、図-5に示す。また、本実験では、画像中の 9 つの赤い点を探索初期点 A-I として設定した。これにより、初期点の位置による検出結果への影響を検討する。表-1 は、カメラ 6 台の撮影データに対して、目視また提案手法で赤色 LED

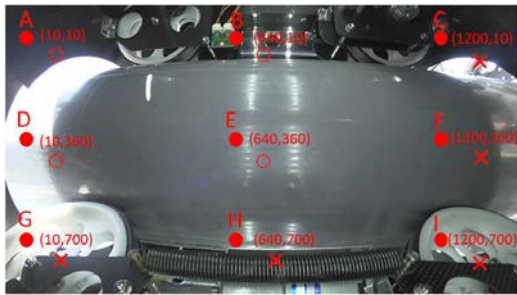


図-4 カメラ#1の撮影画像と探索初期点

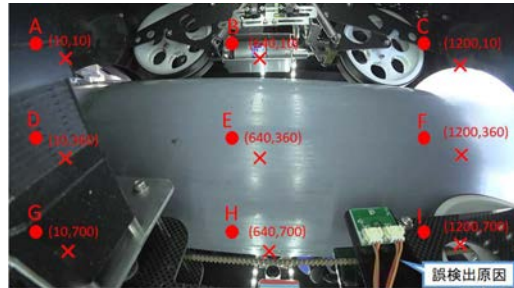


図-5 カメラ#6撮影画像と探索初期点

点灯を検出したフレーム番号を示す。さらに、表-2 は各カメラの映像に各探索初期点から赤色 LED の点灯検出を行った結果を示す。

(2) 結果と考察

表-1 の実験結果より、本手法で検出した赤色 LED 点灯のフレーム番号と、目視で確認したフレーム番号が一致した。この結果より、提案手法を用いることで、展開図作成のための赤色 LED 点灯検出の自動化が可能であることが示された。

表-2 の実験結果より、探索初期点から緑色基盤が遠い場合、赤色 LED の点灯を検出できなかった。その原因は、探索枠更新の反復回数が 20 回を超え探索を終了したためである。一方で、表-2 の#6 では、図-5 を見て分かるように座標 E, F, H, I では、緑色基盤と初期点の位置が比較的近いが、赤色 LED の点灯を検出できなかった。その原因として、緑色基盤付近に赤い導線があり、赤色 LED と間違えて検出された。上記の条件に該当しない場合は全ての赤色 LED 点灯を検出することができた。

5. まとめ

本研究では、各カメラが撮影した動画に対する展開図作成処理の同期を自動化する手法として、Camshift を使用する手法を提案した。さらに、実画像を用いて各探索初期点から赤色 LED 点灯を検出する実験を行った。実験結果より、初期点位置の設定が適切かつ、点検ロボット内部の緑色基盤の周辺画素に赤色 LED の類似色がな

表-1 赤色 LED の点灯を検出したフレーム番号

データ#	目視	自動	データ#	目視	自動
1	213	213	4	753	753
2	751	751	5	823	823
3	761	761	6	816	816

表-2 各初期点の実験結果

探索初期点	#1	#2	#3	#4	#5	#6
緑色基盤	赤 L E D	緑色基盤	赤 L E D	緑色基盤	赤 L E D	緑色基盤
A	○	○	○	○	○	○
B	○	○	○	○	○	○
C	○	○	○	○	○	○
D	○	○	○	○	○	○
E	○	○	○	○	○	○
F	○	○	○	○	○	○
G	○	○	○	○	○	○
H	○	○	○	○	○	○
I	○	○	○	○	○	○

×: 誤検出 ○: 検出

い場合において、赤色 LED の点灯を正確に検出することが確認できた。また、探索初期点の位置設定が赤色 LED から遠すぎたり、赤色 LED と類似した色の画素が緑色基盤の周辺にあった場合、誤検出される可能性があることが示された。しかし、本実験で誤検出の原因となった赤い導線は、黒いテープで導線を包む等の対策により、上記の誤検出を防止できると考えられる。

謝辞：本研究にご協力頂いた株式会社テクノフラッシュの車田茂美氏、本多健治氏に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路統計年報 2020 橋梁の現況，
<<https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2020/nenpo03.html>>，
(入手 2021.05.14).
- 2) 長大：斜張橋ケーブル点検ロボット VESPINAЕ，
<<https://www.chodai.co.jp/vespinae/>>，(入手 2021.6.4).
- 3) 西松建設：斜張橋点検ロボット「コロコロチェッカー」のオプション装置を開発，
<<https://www.nishimatsu.co.jp/news/news.php?no=MzUx>>，(入手 2021.6.4).
- 4) 河村 圭，橋本 祐弥，塩崎 正人，中村 隆史：斜材表面の画像展開図作成における曲面の平面化手法の提案，土木学会論文集 F3，Vol.77，No.2，pp.I_51-I_57，2021.
- 5) Bradski GR.: Computer Vision Face Tracking For Use in a Perceptual User Interface[C]// Proceedings of the Fourth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV'98). IEEE, 1999.