

(39) 斜張橋ケーブル点検ロボットにおける 点検記録プロトタイプシステムの開発

長谷川 瑛士¹・河村 圭²・塩崎 正人³

¹正会員 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: g067vg@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 山口大学大学院准教授 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正会員 三井住友建設株式会社 技術本部 建設情報技術部 (〒104-0051 東京都中央区佃 2-1-6)
E-mail: MasandoShiozaki@smcon.co.jp

著者らは斜張橋ケーブルの点検の効率化を目的として点検ロボットの開発を進めている。本点検ロボットは、斜張橋ケーブルに装着し、UAVによりケーブル最上部へ打ち上げられた後、降下中に斜張橋ケーブル保護管表面を撮影する。著者らが開発している点検ロボットの特徴として、自己位置推定を用いた画像結合による撮影画像展開図の作成がある。本研究では、点検ロボットの自己位置推定を用いた画像結合の精度向上のため、円周方向回転を考慮した結合手法を提案した。さらに、本研究では、実際の斜張橋ケーブル保護管を設置した実験場で撮影を行い、撮影画像を用いた画像結合の精度検証を行った。

Key Words: Cable-stayed bridges, inspection, robot, localization, combining images

1. はじめに

近年、斜張橋の高齢化に伴い、その維持管理の重要性が増している。2014年4月までに、国内の斜張橋は、約300橋建設されており¹⁾、斜張橋の維持管理の重要項目の一つとして、主要部材である斜張橋ケーブル(以下、斜材とする)の機能保持がある。このことから、ロボットを用いた斜材点検装置²⁾の開発が進んでいる。既存開発としては、VESPINAE³⁾、コロコロチェッカー⁴⁾、著者らの斜材点検ロボット⁵⁾などが挙げられる。著者らが開発している点検ロボットの特徴の一つに、点検ロボットが撮影した斜材表面画像からの展開図作成がある。本研究の目的は、本点検ロボットが生成する撮影画像展開図の画像結合精度の改善である。具体的には、従来の点検ロボットでは円周方向移動を記録していなかったため、斜材表面撮影中に点検ロボットが回転すると、カメラ1台分の画像間結合の結果が、斜材表面に対応した正確な位置に結合されない問題があり、この改善を行った。さらに、本研究では、実験場で実スケールの斜材保護管を撮影し、本点検ロボットの画像結合精度を検証した。

2. 斜張橋ケーブル点検ロボット

(1) 斜張橋ケーブル点検ロボットによる点検

本点検ロボットの点検方法は、UAVを用いて本点検ロボットを斜材最上部へ移動させた後に、本点検ロボットをケーブル最上部より等速で降下させつつ、本点検ロボットに搭載された4台のカメラにより自動で斜材保護管全周を撮影する。なお、本点検の成果物は、撮影動画および撮影画像展開図である。

(2) 斜張橋ケーブル点検ロボットの構成

本点検ロボットは、「撮影ロボット」および「打ち上げロボット(UAV)」から構成される。ここで、UAVは、撮影ロボットを斜材最上部へ打ち上げるために用いる。また、撮影ロボットは、「点検記録システム」および「等速降下機構」から構成される。点検記録システムは、点検結果を記録するために用いる。一方で、等速降下機構は、斜材最上部より、撮影ロボットを一定速度で降下させるために用いる。ここで、図-1に撮影ロボットの実験風景を示す。

3. 点検記録システム

点検記録システムは、「撮影装置」，「移動量計測装置」，および「画像結合ソフト」の3つで構成される。本点検記録システムは，UAVにより斜材最上部まで打ち上げられた後に，等速降下機構を用いて，降下時に撮影を行う。ここで，図-2に撮影ロボットの内部を示す。本点検記録システムの主な要件は，「撮影装置の構成を安価かつ軽量にすること」，「1度の撮影で斜材全周を撮影すること」，「撮影動画から斜材全周の撮影画像展開図の作成を可能とすること」，さらに「撮影画像展開図から10mmの割れを確認できること」の4点である。

本研究では，上記要件を満たすため，安価かつ軽量のUSBカメラとミニPCを用いて撮影装置を開発した。また，動画および撮影画像展開図を点検結果として出力させるために，移動量計測装置と画像結合ソフトを開発した。撮影装置は，バッテリー，ミニPC，USBカメラ，LED照明で構成される。移動量計測装置は，ロータリーエンコーダ，傾斜計，データロガーで構成される。既存研究では，ロータリーエンコーダとデータロガーのみが実装されていたため，点検中に点検ロボットの回転移動情報が記録されなかった。よって，本研究では，既存の移動量計測装置に傾斜計を追加した。これにより，移動量計測装置は，撮影時の点検ロボットの斜材延長方向に対する移動距離(mm)をロータリーエンコーダで計測し，点検ロボットが斜材円周方向に回転した角度($^{\circ}$)を傾斜計で計測する。また，計測した値は，データロガーにより，記録時間とともに記録する。なお，記録周期は0.02秒である。これらの記録情報は，記録時間ごとの点検ロボットの自己位置情報であり，撮影動画より作成されるキャプチャ画像間の結合位置座標の算出に使用する。画像結合ソフトは，撮影画像と自己位置情報より，撮影画像展開図の作成を行う。

4. 画像結合ソフト

本章では，画像結合ソフトの各処理について記述する。ここで，図-3には，連結画像作成までの動作手順，各処理，さらに各処理で生成される生成物を示す。

(1) 録画処理

録画処理では，動画ファイルおよび静止画像保存時間ファイルを作成する。なお，静止画像保存時間ファイルは，USBカメラからミニPCへと動画ファイルを構成する画像情報が送信された時刻を，静止画像保存時間として記録する。

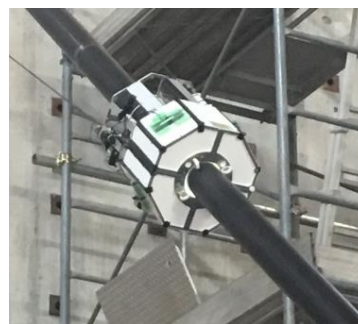


図-1 撮影ロボット(等速降下機構除く)の実験風景

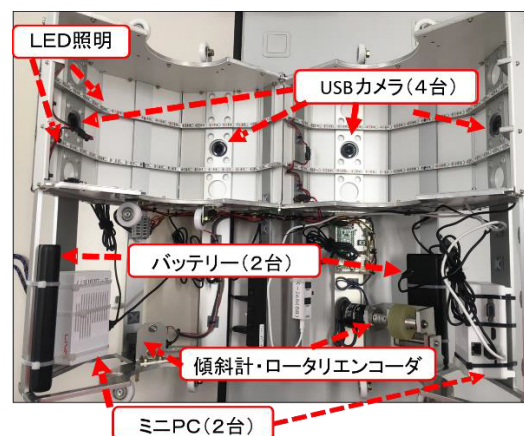


図-2 撮影ロボット(等速降下機構除く)の内部

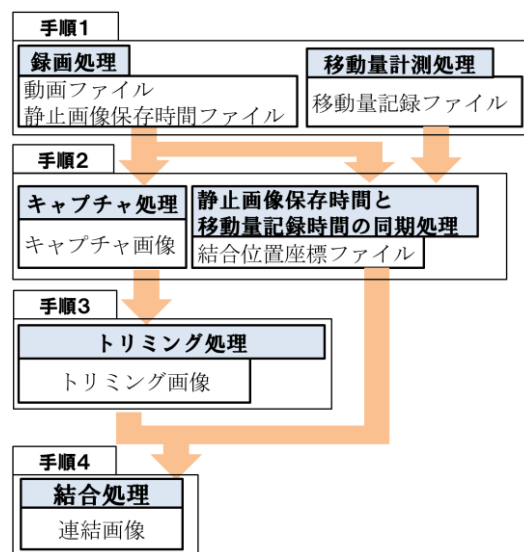


図-3 画像結合ソフトの動作手順

(2) キャプチャ処理

本処理では，キャプチャ画像を生成する。具体的には，撮影動画を1フレームごと分割し，静止画像であるキャプチャ画像をpng形式で生成する。なお，画像サイズは640×480pixelである。

(3) 静止画像保存時間と移動量記録時間の同期処理

本処理では，結合位置座標ファイルを生成し記録する。具体的には，「静止画像保存時間」と「移動量計測装置

のデータロガーにより記録された記録時間」の記録開始時間の差を手動で同期させる。同期させることで、移動量計測装置が記録した撮影装置の斜材延長方向移動距離(mm)および撮影装置が回転した角度(°)から、各キャプチャ画像間の結合位置座標(pixel)が算出可能となる。著者らの既存研究では、ロータリーエンコーダの計測値を、延長方向移動量(pixel)へ変換する式のみ実装していた。本研究では、傾斜計を追加したことから、傾斜計の計測値を、円周方向移動量(pixel)へ変換する式を追加した。ここで、式(1)および式(2)には、データロガーにより記録された情報を、延長方向移動量(pixel)および円周方向移動量(pixel)へ変換する式をそれぞれ示す。

$$\text{延長方向移動量(pixel)} = \frac{a}{\sigma} \quad (1)$$

$$\text{円周方向移動量(pixel)} = \frac{b}{\sigma} \times \frac{\pi R}{360} \quad (2)$$

ここで、 a はロータリーエンコーダが計測した移動距離(mm)、 b は傾斜計が計測した回転角度(°)、 σ は画素分解能(mm/pixel)、 R は斜材外径(mm)である。なお、本式で算出された値は、結合位置座標ファイルに記録される。

(4) トリミング処理

本処理では、キャプチャ画像から結合に必要な領域をトリミングし、トリミング画像を作成する。トリミングを行う理由は、広角レンズを使用することにより、撮影画像には歪みが生じることから、歪みによる結合結果への影響を軽減するためである。具体的には、画像中央部に近いほど歪みの影響が少ないため、画像中央部が結合に利用されるように画像端部を取り除く。

(5) 画像結合処理

本処理では、トリミング画像と結合位置座標ファイルを用いて、連結画像を作成する。図-4には、前後画像間の結合方法のイメージを示す。

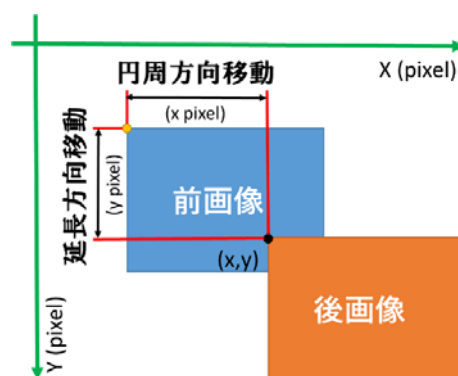


図-4 画像結合処理イメージ



(a) 提案手法連結画像



(b) 既存手法連結画像

図-5 結合結果

(1マス 40mm×40mm)を貼り付けた。本実験は、撮影した動画から、「点検ロボットの円周方向移動を考慮した手法を実装した点検記録システム(提案手法)」および「未実装である既存の点検記録システム(既存手法)」それぞれで、連結画像を作成し、結合精度を比較した。

c) 結果

図-5には、(a)提案手法連結画像と(b)既存手法連結画像を示す。(b)の連結画像では、直線であるべき方眼の線が湾曲しており、実際の斜材表面と異なっている。しかし、(a)の連結画像は、方眼の線が直線となっている。以上のことより、提案手法は、撮影時に発生した点検ロボットの回転に対応した円周方向移動の情報を適切に処理可能である。しかし、斜材保護管表面(曲面)を撮影しているため、斜材円周方向における画像の図-5(a)中の「番号1の方眼」と「番号7の方眼」の大きさに差ができる。このことから、今後の課題として、正確な連結画

5. 実験

(1) 検証 A：点検ロボットの円周方向回転を考慮した画像結合精度の検証

a) 実験目的

本実験では、移動量計測装置に搭載した傾斜計の測定値を用いた画像結合手法の精度を検証した。

b) 実験条件

本実験では、点検ロボットの円周方向回転を考慮した画像結合手法の有効性を検証するために撮影中に人為的に点検ロボットを回転させ、撮影を行った。また、結合精度を確認するために、撮影対象の斜材保護管に方眼紙

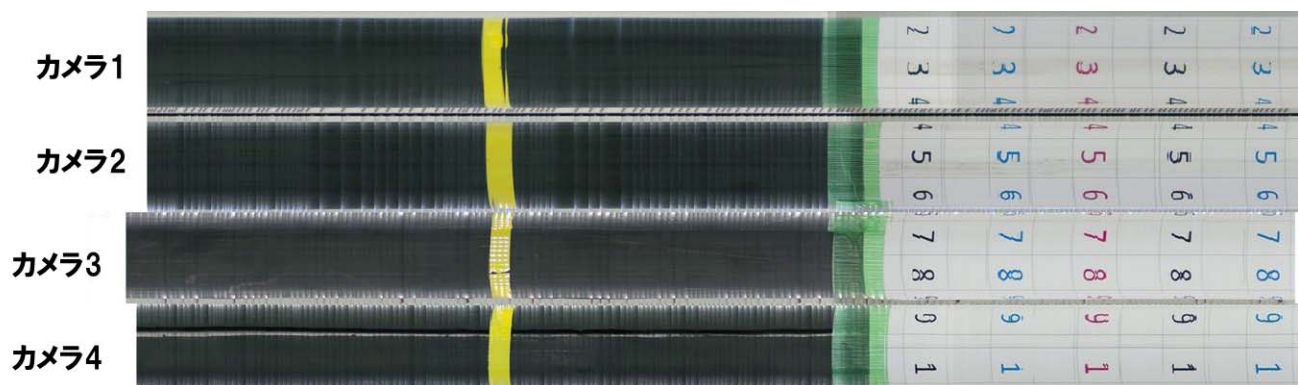


図-6 撮影画像展開図(一部)

像を作成するために、曲面の補正を行った画像を作成する必要がある。

(2) 検証B：実験場での結合画像精度の検証

a) 実験目的

本実験では、実スケールの斜材保護管を設置した実験場でカメラ4台搭載した撮影ロボットを用いて撮影を行い、撮影結果画像を用いて画像結合の精度を検証した。

b) 実験条件

本実験では、室内実験場に設置した7mの斜材保護管を用いて計測を行った。また、本実験の点検では、ウィンチを用いて撮影ロボットを昇降させ、撮影を行った。なお、ウィンチによる撮影ロボットの移動速度は100mm/sとした。また、本実験では、撮影画像展開図の作成精度を検証するために、格子の大きさが40mm×40mmの方眼紙を斜材保護管に巻き付けた。

c) 結果

本実験では、まず、撮影に利用したカメラ4台ごとにケーブル延長方向に連結画像を作成した。続いて、作成した連結画像4枚を並べることで、撮影画像展開図を手動で作成した。ここで、図-6には、連結画像を4つ並べて作成した撮影画像展開図の一部を示す。また、図-7には、連結画像の精度を検証するため、カメラ2の方眼紙部分を拡大した拡大画像を示す。なお、図-7における破線部分は、結合のズレにより発生した二重線部を示す。図-6より、方眼紙に記される数字が読み取れる精度で、正確に画像間結合が行われている。また、図-7の拡大画像より、二重線が発生している箇所がある。この原因は、静止画像保存時間と移動量記録時間の同期処理において、手動の設定を行っているため、正確な時刻同期を行えていないと考える。なお、連結画像における二重線の幅は、約9pixelであり、キャプチャ画像の画素分解能0.375mm/pixelから約3.4mmであった。

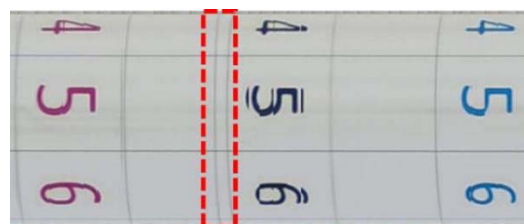


図-7 二重線部(カメラ2の拡大図)

6. まとめ

本研究では、「検証A：点検ロボットの円周方向回転を考慮した結合画像精度の検証」および「検証B：実験場での結合画像精度の検証」を行った。検証Aでは、移動量計測装置に傾斜計を実装し、傾斜計の計測値を連結画像作成に用いることで、結合精度が向上した。しかし、正確な連結画像を作成するためには、斜材保護管円周方向の曲面補正を画像に施す必要がある。検証Bでは、カメラ4台を搭載した撮影ロボットを用いて実環境に近い環境で点検を実施した結果として、作成される連結画像は約3.4mm程度のズレが生じる精度で結合可能であることが示された。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路統計年報，<http://www.mlit.go.jp/road/ir-data/tokei-nen/2015/pdf/k_genkyou40.pdf>，(入手2017.6.19)。
- 2) 岡田成礼：斜張橋の保護管点検ロボットの開発について，<http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000105692.pdf>，(入手2017.6.19)。
- 3) 長大：斜張橋ケーブル点検ロボット「VESPINAE」，<<https://www.chodai.co.jp/news/20170316.pdf>>，(入手2017.6.19)。
- 4) 西松建設：斜張橋の斜材保護管点検ロボットコロコロチェッカー，<http://www.nishimatsu.co.jp/assets/upload/solution/1455769046_074527800.pdf>，(入手2017.6.19)。
- 5) 河村圭，長谷川達哉，塩崎正人：斜張橋ケーブル点検ロボットにおける点検記録システムの基礎研究，土木学会論文集F3，Vol.72，No.2，pp.I_83-I_92，2016。