

(43) 斜材表面の画像展開図作成における 曲面の平面化手法

橋本 祐弥¹・河村 圭²・塩崎 正人³・中村 隆史⁴

¹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: b052vg@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

⁴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: t-nakamura@smcon.co.jp

現在、斜張橋の斜材の点検は、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の安全に細心の注意を払いながら作業を行う必要があるといった問題がある。そこで筆者らは、斜材点検の効率化を図るため、斜張橋ケーブル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、画像展開図を作成する上で課題となっていた斜材表面の平面化手法として、幾何学的に導き出した画像変換式を利用する手法を提案するとともに、その変換式を実装した結果を示す。

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

1. はじめに

近年、道路橋梁の老朽化が進んでおり、その維持管理の必要性が高まっている。斜張橋の維持管理において重要な項目は、橋桁を支えている斜材の機能保持である。斜材の点検は、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、点検者の安全に細心の注意を払いながら作業を行う必要があるといった問題がある。

このことから、我が国ではロボットを用いた点検装置の開発が活発的に進んでいる。既存開発として、VESPINAE¹⁾やコロコロチェッカー²⁾などが存在し、筆者らも斜張橋ケーブル点検ロボットの開発を以前から進めている^{3,4)}。本点検ロボットは、一度の昇降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。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。

本研究では、画像展開図を作成する上で課題となっていた斜材表面の平面化を、幾何学的に導き出した変換式を利用することで実現する手法を提案するとともに、変換式を画像処理プログラムとして実装した結果を示す。

2. 斜張橋ケーブル点検ロボット

斜張橋ケーブル点検ロボットによる点検は、斜材表面をロボットにより撮影し、撮影した動画から画像展開図を作成することで行われる。斜材に取り付けた状態の斜張橋ケーブル点検ロボットの外観を図-1に示す。

(1) 斜張橋ケーブル点検ロボットの構成

斜張橋ケーブル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、

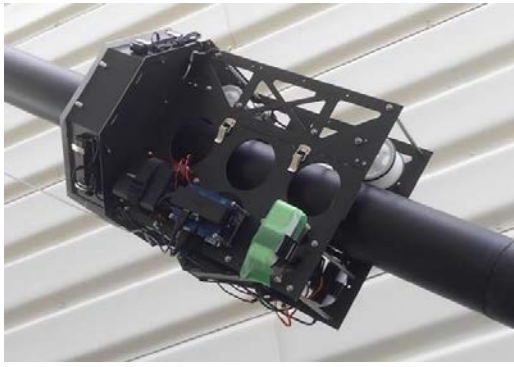


図-1 斜張橋ケーブル点検ロボットの外観（斜材装着時）

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、静止画像であるキャプチャ画像をpng形式で生成する。

STEP2（レンズ歪み補正）：広角レンズのカメラで撮影した画像には、必ずレンズによる樽型の歪みが発生している。そのため、本STEPでは、事前に行われたカメラキャリブレーションにより得られたパラメータを利用して、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、一枚目のキャプチャ画像のみ指定して、それ以外は自動で切り取る。

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を適用する。詳細は次章で記述する。本稿は、本STEPの手法を検討したものである。

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、カメラ6台分の連結画像が作成され、斜材表面全周を写した画像展開図が完成する。ただし、本STEPの画像結合手法は未開

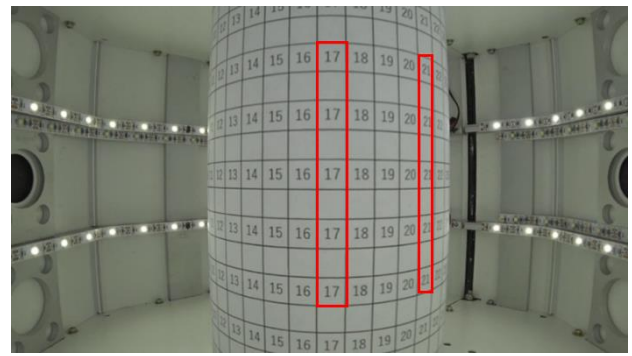


図-2 斜材に方眼紙を巻いて撮影した画像

発の状態であり、本開発での今後の課題となる。

3. 平面化の変換式

画像展開図の作成は、撮影した動画を1フレームごとにキャプチャした画像を結合することで行われるが、キャプチャ画像をそのまま使用して結合した場合、正確な画像展開図を作成することはできない。ここで、斜材に方眼紙を巻いて撮影した画像を図-2に示す。図-2の画像中の赤枠で囲われた17番の列の領域と21番の列の領域を見ると、実際は同じ形・大きさであるはずの領域が画像中では違う形・大きさに投影されていることがわかる。このような問題を解決するため、展開図作成において画像結合を行う前に、キャプチャ画像すべてに対し、斜材表面の平面化を行う画像変換処理を行う必要がある。

筆者らの先行研究³⁾では、幾何学変換手法である射影変換を利用することで平面化の実現を目指した。この手法は、平面化の正確性は十分なものであったが、射影変換を利用するためには、斜材に方眼紙を巻いて撮影した画像からコーナーを抽出するという処理を手作業で行う必要があった。また、撮影を続けるうちに、方眼紙が撮影ユニットの車輪に巻き込まれて破損することがあった。これらの問題から、斜材に方眼紙を巻かず平面化する画像変換手法を考える必要が出てきた。

そこで、本章では、幾何学的に導き出した変換式を利用する手法を提案する。

(1) 座標の定義

斜材撮影空間の座標を図-3のように定義する。カメラのモデルとしては、ピンホールカメラモデルが一般的に用いられる。このピンホールによる射影は、中心射影や透視投影と呼ばれている。座標系は2つ存在し、一つは光学中心を原点としたカメラ座標系であり、もう一つは3次元空間が投影されるスクリーンの中心を原点とした画像座標系である。本研究では、スクリーンはカメラ座標系のZ軸に垂直になるように設定する。また、カメ

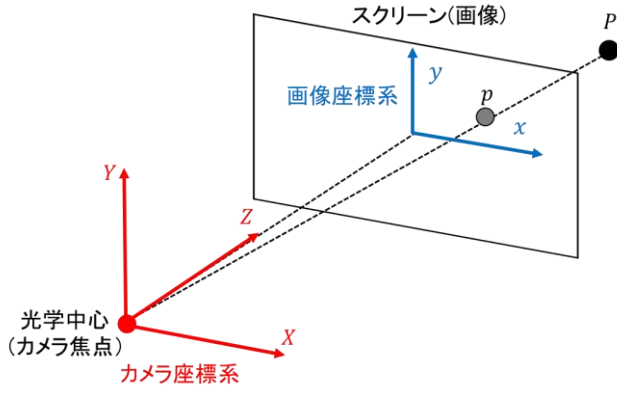


図-3 ピンホールカメラモデル

ラ座標系における光学中心からスクリーンまでの距離は、カメラの焦点距離に相当するものとする。これにより、3次元空間中の点 P の座標 $(X, Y, Z)^T$ と、 P がスクリーン上に投影された点 p の座標 $(x, y)^T$ の間には、以下の式が成り立つ。

$$x = \frac{X}{Z}f \quad (1)$$

$$y = \frac{Y}{Z}f \quad (2)$$

ここで、 f はカメラの焦点距離を表し、使用するカメラによって決まる値である。

(2) 平面化の変換式

本節では、式(1)および式(2)で表される3次元空間の座標と投影面の座標の關係に着目し、斜材表面を平面化する変換式を導出する。

本稿では、 x 座標の変換式の導出方法のみの詳細を解説する。X-Z平面における斜材撮影時のカメラ、斜材、スクリーンの位置關係を図-4に示す。図-4において、点 P_1 はカメラの光軸と斜材表面の交点であり、撮影した画像に投影されている点である。ここで、点 P_1 の座標は (X', Z') とする。点 P_2 は斜材表面を平面化したときに点 P_1 が移動すると仮定した点である。点 P_2 の X 座標は、 Z 軸と斜材表面の交点から点 P_1 までの円弧の長さ $R\theta$ に等しい。また、点 P_2 の Z 座標は、カメラから斜材中心までの距離 Z_0 と斜材の半径 R の差に等しい。なお、 θ は以下の式で求まる。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{X'}{R}\right) \quad (3)$$

点 p_1 と p_2 は、それぞれ点 P_1 と P_2 がスクリーン上に投影された点であり、それぞれの x 座標 x_1 と x_2 は、以下の式で表される。

$$x_1 = \frac{X'}{Z'}f \quad (4)$$

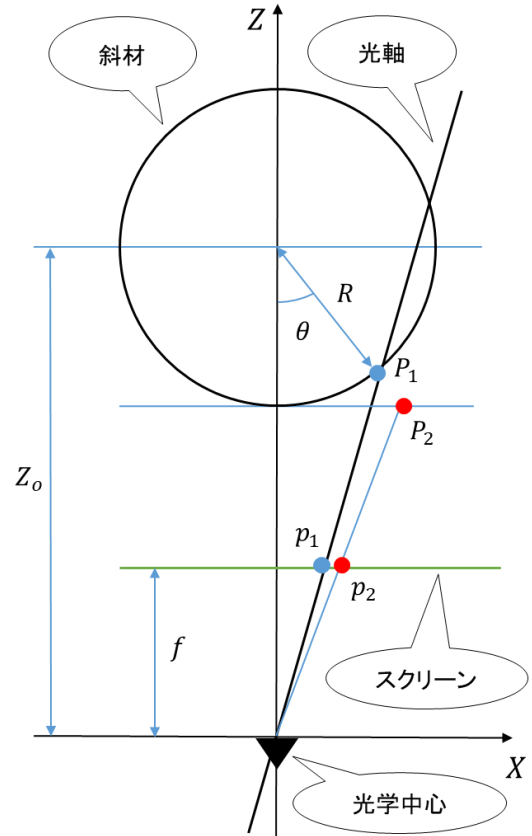


図-4 斜材撮影時の位置関係 (X-Z平面)

$$x_2 = \frac{R\theta}{Z_0 - R}f \quad (5)$$

そして、式(4)を変形し、式(3)とともに式(5)に代入すると、 x_1 と x_2 の間には、以下の式が成り立つ。

$$x_2 = \frac{Z'R \sin^{-1}(X'/R)}{X'(Z_0 - R)}x_1 \quad (6)$$

以上、式(6)が x 座標の変換式となる。

なお、カメラの光軸と斜材表面の交点 (X', Z') は、光軸の方程式の連立方程式を解くことで求まる。カメラの光軸の方程式を式(7)に、斜材表面の方程式を式(8)に示す。

$$Z = \frac{f}{p \cdot x}X \quad (7)$$

$$X^2 + (Z - Z_0)^2 = R^2 \quad (8)$$

ここで、式(7)中の p はセンサーの画素ピッチを表し、 x はセンサーの x 座標の画素数を表す。画素ピッチとは、撮像素子の中心線の間隔であり、使用するカメラによって決まる値である。

x 座標の変換式と同様に、 y 座標の変換式も導出する。 p_1 と p_2 の y 座標 y_1 と y_2 の間には、以下の式が成り立つ。

$$y_2 = \frac{Z'}{Z - R}y_1 \quad (9)$$

以上、式(9)が y 座標の変換式となる。



図-5 変換前画像

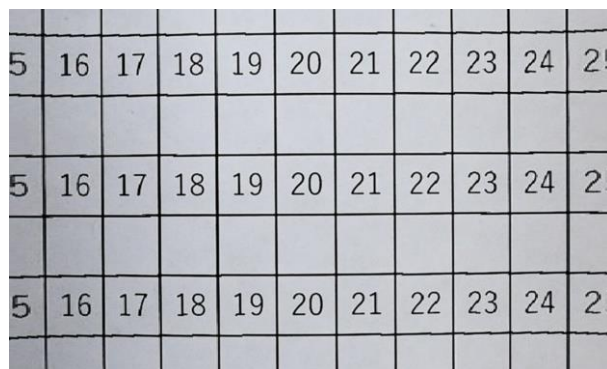


図-6 変換後画像

4. 変換式の実装

本章では、3章で提案した変換式を画像処理プログラムとして実装した方法とその結果を示す。

(1) 撮影方法

本研究では、斜材の代わりに半径 57mm の PE 管に評価用の方眼紙 (1 マス 10×10mm) を巻いたものを手で撮影した。カメラは、Nikon 7500D を使用し、焦点距離は 18mm に設定した。本カメラを使用した理由は、変換に必要な画素ピッチや焦点距離の値が明確なためである。カメラから PE 管の中心までの距離は、約 300mm となるように撮影した。ここで、撮影した画像から PE 管が投影されている領域の一部を切り取った画像 (変換前画像) を図-5 に示す。画像の大きさは、1422×838pixel である。

(2) 実装方法

アフィン変換などの変換式を画像に実装する場合、逆変換式を用いて、変換後の座標(x', y')から変換前の座標(x, y)を求め、再標本化することにより得られた座標(x, y)の画素値を、変換後の座標(x', y')の画素値とする方法が一般的である。本研究においても、上記の方法で変換式を画像に実装した。なお、再標本化手法は最近傍内挿法を用いた。

(3) 実装結果

変換式を実装して生成された画像を図-6 に示す。図-6 の画像では、左端の 15 番の列と右端の 25 番の列の領域が少し歪んでいるが、16 番から 24 番までの画像のほとんどの領域で、概ね良好に平面化が行われている。以上より、提案した変換式を用いることで、斜材表面の平面化が可能であることが示された。

5. まとめ

本研究では、斜材点検のための画像展開図作成における斜材表面の平面化手法として、幾何学的に導き出した画像変換式を利用する手法を提案するとともに、変換式を画像処理プログラムとして実装した結果を示した。実装結果より、本手法による平面化は、良好な精度で可能であることが示された。ただし、本手法を使用するには、カメラと斜材の位置関係やカメラの仕様が明確でなければならない。

今後の課題として、斜張橋ケーブル点検ロボットを用いて実橋での撮影を行い、本手法を用いて平面化を行うことで、画像展開図作成における画像結合精度への影響を確認する必要がある。

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) 長大：斜張橋ケーブル点検ロボット VESPINAE, <[https://www.chodai.co.jp/vespinae/](https://www.chodai.co.jp/vespiniae/)>, (入手 2020.5.29).
- 2) 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 2020.5.29).
- 3) 河村 圭, 長谷川 瑛士, 塩崎 正人：斜材ケーブル点検ロボットの展開図作成のための射影変換による円周曲面の補正手法の提案, 土木学会論文集 F3, Vol 74, No.2, p. I_113-I_120, 2018.
- 4) 三井住友建設：実橋で斜張橋ケーブル点検ロボットによる実証実験を実施, <<https://www.smcon.co.jp/topics/2018/06081200/>>, (入手 2020.5.29).