

# 光切断法による長尺構造物内部の3次元計測のためのパターン投影による運動推定

東京大学 ○樋口 寛, 浅間 一, 安琪, 山下 淳

## 1 序論

トンネルなどの大型長尺構造物内部の計測では、レーザスキャナなどを用いて複数地点で計測した局所的な3次元形状の統合が必要になる。過去には環境中の2次元的なテクスチャ情報 [1] や、3次元的な凹凸などの情報 [2] に基づいて座標系を統合するアプローチが提案されている。しかし、内部の表面が滑らかでテクスチャが乏しいトンネルも存在するため、統合に必要な計測装置の位置・姿勢推定は一般に困難である。

本研究では能動的に投影したパターンを特徴量として利用することにより、環境中に2次元的または3次元的な特徴が乏しい環境においても適用可能な長尺構造物内部の3次元計測手法の提案を目的とする。

## 2 提案手法

提案システムの概要を図1に示す。システムは断面計測部、およびアンカー部の2種類の装置で構成される。断面計測部はカメラとリングレーザ（断面計測レーザと呼ぶ）を搭載し、リングレーザが照射する断面領域の形状を光切断法により計測する。アンカー部は互いに位置関係が固定された2本のリングレーザ（アンカーレーザと呼ぶ）を搭載し、断面計測部の運動推定のための特徴点を生成する。環境の形状によらずに2次元的な特徴量を生成するために、断面計測レーザは円周方向に異なる間隔で分割したパターンを投影する。

計測の入力画像は撮影と装置の移動を繰り返すことにより取得する。ただし、装置の運動に関して、一方の装置が移動する際に他方の装置は環境に対して静止

する状況を考える。計測時にはアンカー部が1回移動した後に断面計測部が複数回移動する運動を繰り返す。

提案手法では画像取得の時刻  $(i, j)$  をアンカー部が  $i$  回動いた後に断面計測部が  $j$  回動いたときの時刻と定義する。ただし、アンカー部の合計移動回数は  $n$  回、アンカー部が  $i$  回動いた後にアンカー部が再度動くまでの断面計測部の合計移動回数を  $m_i$  とする。

取得したカメラ画像から以下の処理を行うことにより、長尺構造物の3次元形状を計測する。

### 2.1 光切断法に断面形状計測

カメラ画像を入力として、各時刻のカメラ座標系における断面計測レーザの投影点の3次元座標を光切断法により計測する。画像上の断面計測レーザの2次元座標と事前にキャリブレーションしたカメラと断面計測レーザの位置・姿勢関係から三角測量により点群座標を計算する。

### 2.2 断面計測部の位置・姿勢推定

アンカー部の位置・姿勢が同一となる時刻  $(i, 0), (i, 1), \dots, (i, m_i)$  においては、アンカー部が投影するパターンは環境に対して静的な特徴となる。生成された特徴を利用して Structure from Motion (SfM) によるスケールを除く5自由度の位置・姿勢を推定する。時刻  $(i, j)$  の断面計測部の座標系を  $\Sigma_{C(i,j)}$  とする。8点法により  $\Sigma_{C(i,0)}$  と  $\Sigma_{C(i,0)}$  の座標原点間の距離を1と仮定した場合の  $\Sigma_{C(i,j)}$  から  $\Sigma_{C(i,0)}$  への座標変換行列  ${}^{C(i,0)}\tilde{\mathbf{T}}_{C(i,j)}$  を推定することが可能である。したがって、 $\Sigma_{C(i,j)}$  から  $\Sigma_{C(i,0)}$  への実スケールの座標変換行列は  ${}^{C(i,0)}\tilde{\mathbf{T}}_{C(i,j)}$  と未知のスケールパラメータ  $s_i$  を使用して以下のように表すことができる。

$${}^{C(i,0)}\mathbf{T}_{C(i,j)}(s_i) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & s_i \\ 1 & 1 & 1 & s_i \\ 1 & 1 & 1 & s_i \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * {}^{C(i,0)}\tilde{\mathbf{T}}_{C(i,j)}. \quad (1)$$

一方、アンカー部の位置・姿勢が変化する時刻

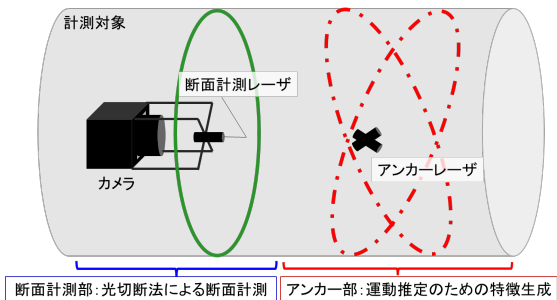


図1 提案システムの模式図

$(i, m_i), (i + 1, 0)$ の間では断面計測部は静止するため、以下の関係が成立する。

$$\Sigma_{C(i, m_i)} = \Sigma_{C(i+1, 0)}. \quad (2)$$

式 (1) と式 (2) より、任意の時刻の位置・姿勢を  $s_0, s_1, \dots, s_i$  を用いて下記のように表すことができる。

$$\begin{aligned} C_{(0,0)} \mathbf{T}_{C(i,j)}(s_0, \dots, s_i) = & C_{(0,0)} \mathbf{T}_{C(0, m_0)}(s_0) \\ & C_{(1,0)} \mathbf{T}_{C(1, m_1)}(s_1) \dots \\ & C_{(i-1,0)} \mathbf{T}_{C(i-1, m_{i-1})}(s_{i-1}) \\ & C_{(i,0)} \mathbf{T}_{C(i,j)}(s_i). \end{aligned} \quad (3)$$

### 2.3 スケール決定と断面形状の統合

位置・姿勢推定結果にスケールパラメータを代入することにより、各時刻のアンカーレーザ点群を統一した座標系に変換することができる。統合される断面形状の点群とアンカーレーザの点群は同一の計測面を計測した結果であるため、座標統合時に同一の計測点の座標は一致する。上記の拘束条件を満たすようにスケールパラメータ  $s_i$  を最適化することにより、スケールの決定と断面形状の統合を同時に行う。

## 3 シミュレーション実験

3次元計測のシミュレーション実験を行った。実験環境には3DCGソフトウェアBlenderを使用した。

断面計測部には、センササイズ 35 mm、水平画角 140 deg、解像度 3840×2160 のカメラ1台と、断面計測レーザとして緑色リングレーザ1本を使用した。断面計測レーザはカメラ原点から 2 m の位置にカメラ光軸とレーザ平面が垂直となるように配置した。アンカー部には、円周方向にランダムな間隔でパターンを分割した赤色リングレーザ2本をアンカーレーザとして使用した。アンカーレーザは互いのリングレーザの張る平面のなす角度が 30 deg となるように配置した。

計測は 4 m×4 m×10 m の直方体内部を対象に実施した。断面計測部をカメラ光軸方向に 100 mm の移動を 10 回繰り返した後にアンカー部を 1 m 移動させる運動を 1 ループとして、上記の運動を 10 ループ実施した。

実験結果を図 2 に示す。図 2 には光切断法による断面計測レーザ点群と SfM によるアンカーレーザ点群を、それぞれ緑色と赤色の点群で表示した。結果より、直

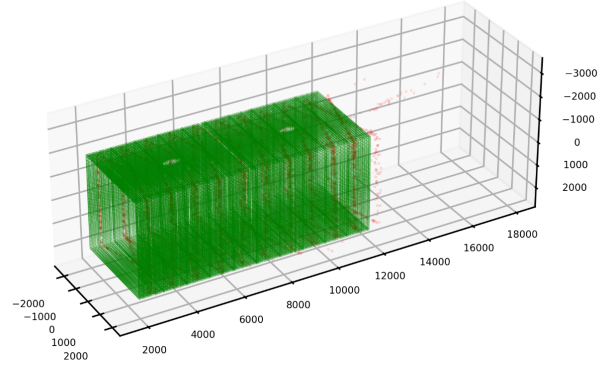


図 2 提案手法による 3 次元計測結果

方体の形状を実スケールで復元できることを確認した。

精度評価のために、真値形状の壁面と断面計測レーザ点群とのユークリッド距離を計算したところ、平均 16.1 mm、標準偏差 16.8 mm となった。誤差の原因としては SfM の入力となる異なる画像間の対応点の検出処理における誤対応の影響が考えられる。誤対応が発生しにくいレーザパターンへの改良、誤対応除去アルゴリズムの改良により誤差の軽減が可能と考えられる。

## 4 結論

本稿では、トンネルなどの環境特徴の乏しい大型長尺構造物に対して、環境中に能動的に特徴点を生成することで、光切断法による局所断面形状を実スケールで統合可能な手法を提案した。

今後の展望は回転を含む運動に対する提案手法の有効性の検証および精度の向上である。

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 22K18826 の援助を受けた。

## 参考文献

- [1] A. Duda, J. Schwendner, and C. Gaudig: “SRSL: Monocular self-referenced line structured light”, Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 717–722, 2015.
- [2] R. Kaijaluoto, A. Kukko, and J. Hyypä: “Precise indoor localization for mobile laser scanner”, ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 1, pp. 1–6, 2015.