

# 光切断法による長尺構造物の3次元計測のための 環境特徴に非依存な局所形状の統合

○樋口寛（東京大学） 浅間一（東京大学） 山下淳（東京大学）

## 1. 序論

近年、大型構造物の製造や点検の効率化のために3次元計測の自動化が推進されている。大型構造物の計測においては内部に計測器を設置し、内側から形状を計測する手法が多く利用される。そのような計測条件において、周囲の3次元形状を一度に取得可能な3次元レーザスキャナの利用は有効である。

しかし、レーザスキャナを利用するのみでは要求される3次元形状を取得できない場合も存在する。例えば、代表的な大型長尺構造物であるトンネル内部の全体計測は一般的な計測手法の適用が困難である。内部構造が長大であるために、複数地点での局所的な3次元計測結果のつなぎ合わせが必要になる。しかし、一般的に異なる座標系の計測データを統合するためには、座標系間の位置・姿勢関係を推定する必要がある。位置・姿勢推定には特徴量が手がりとして必要であるため、過去には環境中の2次元的なテクスチャ情報 [1][2] や、3次元的な凹凸などの情報 [3] 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、トンネルは内部の表面が滑らかで、テクスチャが乏しい場合も珍しくないため、環境特徴から計測点間の位置・姿勢を推定することは一般に困難である。

これらの問題を解決するために、筆者らは2台のカメラとリングレーザを利用したトンネル内部の3次元計測システムを提案している [4]。光切断法により計測されるリングレーザの照射領域を特徴量として利用して、2台のカメラの時系列の位置・姿勢を推定することにより、構造物内部の特徴に依存しない広域3次元計測を実現している。しかし、この研究では計測に2台のカメラを必要とする点が課題として挙げられる。複数台のセンサを利用するシステムでは、センサ間の同期やパラメータの調整などが必要になり、計測作業の効率が低下する。

そこで、本研究では、移動を伴う3次元計測において、1台のカメラのみを用いて局所計測と運動推定を同時に実行可能なシステムの提案を目的とする。本稿では提案システムにおける局所計測結果の統合手法の提案および検証を行う。

## 2. 提案手法

### 2.1 提案システムの概要

提案する3次元計測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つの装置から構成される。断面計測部はカメラとリングレーザを搭載し、リングレーザが照射する断面領域の形状の計測に使用する。アンカー部は互いに位置関係が固定されたスポットレーザ群を搭載し、装置の運動推定に必要となる特徴点をレーザ照射により環境中に生成

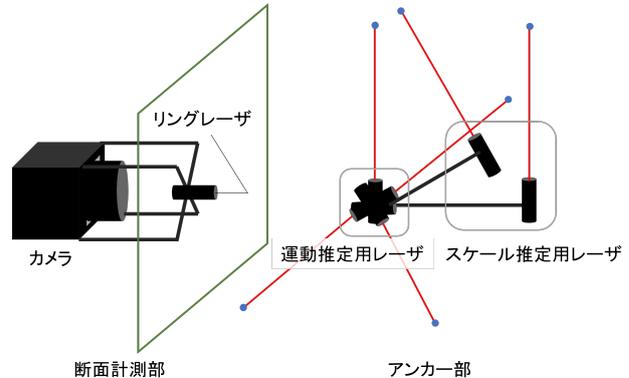


図1 提案システムの模式図

するために使用する。アンカー部のレーザは運動推定用レーザとスケール推定用レーザの2種類のスポットレーザ群から構成される。

3次元計測には断面計測部およびアンカー部を環境内で移動させながら取得したカメラ画像を入力として使用する。提案手法では、計測に使用するカメラ画像を下記の処理を繰り返すことにより取得する。

- (1) カメラ画像取得
- (2) 断面計測部またはアンカー部を移動

ただし、本手法では上記の処理2において一方の装置が移動する際に、他方の装置は常に環境に対して固定されているものとする。取得したカメラ画像から、各画像における断面形状を光切断法により計算し、画像間の装置の運動を推定することにより、各光切断面を統一座標系に統合され、大域的な3次元計測が可能となる。

本稿では、提案システムにおける装置の運動推定手法を提案する。

### 2.2 断面計測部とアンカー部の位置・姿勢推定

同時刻における断面計測部とアンカー部の位置・姿勢関係を推定する手法について述べる。

位置・姿勢推定にはアンカー部が搭載する運動推定用レーザとスケール推定用レーザの情報を利用する。運動推定用レーザは、すべてのレーザの光軸が3次元空間上の1点で交点をもつように配置し、スケールを除く5自由度の運動推定に使用する。スケール推定用レーザは、レーザの光軸が運動推定用レーザの交点を通らないように配置し、スケールを決定するために使用する。提案手法では、運動推定用レーザを5本以上、スケール推定用のレーザを1本以上の合計6本以上のレーザから構成されるアンカー部を使用して、カメラとアンカー部の位置・姿勢関係を求める手法を提案する。

断面計測部、アンカー部の座標系をそれぞれ  $\Sigma_C, \Sigma_L$  とする。  $\Sigma_C$  の原点は搭載するカメラの原点、  $\Sigma_L$  の原点は運動推定用レーザ群の交点とする。運動推定用レーザを  $M$  本、スケール推定用レーザを  $N$  本利用すると、1番目から  $M$  番目のレーザを運動推定用レーザ、  $M+1$  番目から  $M+N$  番目のレーザをスケール推定用のレーザと定義する。座標系  $\Sigma_L$  における各スポットレーザの原点を  $\{\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2, \mathbf{o}_3, \dots, \mathbf{o}_{M+N}\}$ 、方向ベクトルを  $\{\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \dots, \mathbf{q}_{M+N}\}$  とする。また、座標系  $\Sigma_C$  における対応する光線ベクトルを  $\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \dots, \mathbf{r}_{M+N}\}$  とする。したがって、  $i$  番目のレーザ光線と計測面との交点の  $\Sigma_C, \Sigma_L$  における3次元座標  ${}^C\mathbf{p}_i, {}^L\mathbf{p}_i$  は未知数  $\kappa_i, \lambda_i$  を用いて下記のように表現できる。

$${}^C\mathbf{p}_i = \kappa_i \mathbf{r}_i, \quad (1)$$

$${}^L\mathbf{p}_i = \lambda_i \mathbf{q}_i + \mathbf{o}_i. \quad (2)$$

すなわち、座標系  $\Sigma_L$  から座標系  $\Sigma_C$  への回転、並進変換  $\mathbf{R}, \mathbf{t}$  に関して、以下の関係が成立する。

$$\kappa_i \mathbf{r}_i = \mathbf{R}(\lambda_i \mathbf{q}_i + \mathbf{o}_i) + \mathbf{t}. \quad (3)$$

まず、  $1 \leq i \leq M$  に関する式について考える。これらの式については、運動推定用レーザが  $\Sigma_L$  の原点を通ることから  $\mathbf{o}_i = \mathbf{0}$  となるため、式(3)は以下のようになる。

$$\kappa_i \mathbf{r}_i = \lambda_i \mathbf{R} \mathbf{q}_i + \mathbf{t}. \quad (4)$$

式(4)は2台のカメラの位置・姿勢関係を推定する一般的な Structure from Motion の問題と同値である。したがって、スケール以外の5自由度の位置・姿勢を five-point algorithm[5] により推定することが可能である。

続いて、  $M+1 \leq i \leq M+N$  に関する式について考える。並進量を  $s$ 、並進方向ベクトルを  $\hat{\mathbf{t}}$  とすると、

$$\kappa_i \mathbf{r}_i = \mathbf{R}(\lambda_i \mathbf{q}_i + \mathbf{o}_i) + s \hat{\mathbf{t}}. \quad (5)$$

両辺に左から  $(\mathbf{r}_i \times \mathbf{R} \mathbf{q}_i)^\top$  をかけると、

$$(\mathbf{r}_i \times \mathbf{R} \mathbf{q}_i)^\top (s \hat{\mathbf{t}} + \mathbf{R} \mathbf{o}_i) = 0. \quad (6)$$

式(4)から  $\mathbf{R}, \hat{\mathbf{t}}$  は推定済みであり、  $s$  以外のパラメータは既知であるため、式(6)を解くことによりスケールを決定することができる。

以上の処理により、回転、並進方向、並進量を推定することができ、断面計測部とアンカー部の間の6自由度の位置・姿勢関係を推定することができる。

### 2.3 位置・姿勢推定の統合による大域的な運動推定

2.2節で推定した同時刻における、断面計測部とアンカー部の間の位置・姿勢から初期位置を基準としたカメラの大域的な運動を推定する手法を述べる。断面計測部、アンカー部の時刻  $t$  における座標系をそれぞれ  $\Sigma_{C_t}, \Sigma_{L_t}$  とする。座標系  $\Sigma_X$  から座標系  $\Sigma_Y$  への同次座標変換行列を  ${}^Y\mathbf{T}_X$  とする。2.1節で述べたように、断面計測部とアンカー部のいずれか一方は計測時に常に静止する。さらに、2.2節より、任意の  $t$  に対して、

${}^{C_t}\mathbf{T}_{L_t}$  は得られている。これらの条件から、任意の時刻  $t$  における位置・姿勢  ${}^{C_0}\mathbf{T}_{C_t}$  を求める。

まず、  ${}^{C_0}\mathbf{T}_{C_t}$  に関して以下の関係が成立する。

$${}^{C_0}\mathbf{T}_{C_t} = {}^{C_0}\mathbf{T}_{C_1} {}^{C_1}\mathbf{T}_{C_2} \dots {}^{C_u}\mathbf{T}_{C_{u+1}} \dots {}^{C_{t-1}}\mathbf{T}_{C_t}. \quad (7)$$

よって、  ${}^{C_u}\mathbf{T}_{C_{u+1}}$  を求めることにより位置・姿勢が得られる。ここで、時刻  $u$  から  $u+1$  の間の断面計測部の運動に着目して場合分けを行う。

#### 1) 断面計測部が静止する場合

断面計測部の位置・姿勢は変化しないため、以下により位置・姿勢  ${}^{C_u}\mathbf{T}_{C_{u+1}}$  が得られる。

$${}^{C_u}\mathbf{T}_{C_{u+1}} = \mathbf{I}. \quad (8)$$

ただし、  $\mathbf{I}$  は  $4 \times 4$  の単位行列である。

#### 2) 断面計測部が運動する場合

前提条件より、断面計測部が運動している際にはアンカー部は静止しているため、  ${}^{L_u}\mathbf{T}_{L_{u+1}} = \mathbf{I}$  が成立する。したがって、位置・姿勢は以下のように表現できる。

$${}^{C_u}\mathbf{T}_{C_{u+1}} = {}^{C_u}\mathbf{T}_{L_u} {}^{L_u}\mathbf{T}_{L_{u+1}} {}^{L_{u+1}}\mathbf{T}_{L_u} \quad (9)$$

$$= {}^{C_u}\mathbf{T}_{L_u} {}^{C_{u+1}}\mathbf{T}_{L_{u+1}}^{-1}. \quad (10)$$

${}^{C_u}\mathbf{T}_{L_u}, {}^{C_{u+1}}\mathbf{T}_{L_{u+1}}$  は2.2節で述べた処理により得られているため、式(10)により位置・姿勢  ${}^{C_u}\mathbf{T}_{C_{u+1}}$  を得ることができる。

したがって、任意の時刻において位置・姿勢変化  ${}^{C_u}\mathbf{T}_{C_{u+1}}$  が以下のように求まる。

$${}^{C_u}\mathbf{T}_{C_{u+1}} = \begin{cases} \mathbf{I} & (\text{断面計測部が静止}) \\ {}^{C_u}\mathbf{T}_{L_u} {}^{C_{u+1}}\mathbf{T}_{L_{u+1}}^{-1} & (\text{断面計測部が運動}) \end{cases} \quad (11)$$

式(8)と式(11)より初期時刻に対する時刻  $t$  における位置・姿勢  ${}^{C_0}\mathbf{T}_{C_t}$  を得る。よって、各時刻における断面計測部の座標系における光切断法の計測点群を統一座標系  $\Sigma_{C_0}$  に結合して、大域的な3次元形状として復元することが可能となる。

## 3. シミュレーション実験

提案する運動推定手法の有効性を検証するために、シミュレーション実験を行った。断面計測部とアンカー部の位置・姿勢推定実験、および提案システムによる3次元計測実験を行った。

### 3.1 断面計測部とアンカー部の位置・姿勢推定実験

2.2節で提案した断面計測部とアンカー部の間の位置・姿勢推定手法の有効性を検証するための実験を行った。シミュレーション実験には図2に示すように、カメラ1台、運動推定用レーザを6本、スケール推定用レーザを1本を使用した。運動推定用レーザは頂角  $90 \text{ deg}$  の円錐の頂点を原点として、円錐側面上に放射状にレーザ光が照射されるように配置し、スケール推定用レーザは

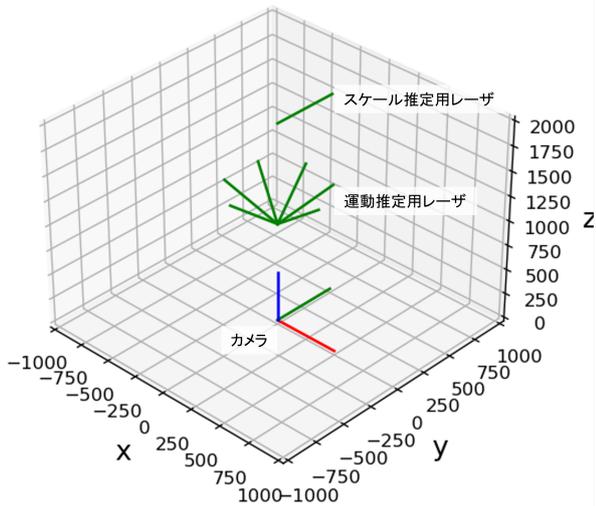


図2 シミュレーション実験条件

運動推定用レーザが張る円錐の原点から距離 1000 mm の位置に円錐軸と垂直な方向に配置した。

実験は、回転、並進、特徴点のパラメータを変化させて 20 試行を行った。回転は x, y, z 軸周りに 0 deg から 45 deg の範囲で、並進は x, y, z 軸方向の移動量が 0 mm から 1000 mm となる範囲で値を与えた。特徴点のパラメータに関しては、式 (5) におけるスポットレーザ光源から照射面までの距離  $\lambda_i$  に 2000 mm から 5000 mm の範囲で値を与えた。

実験結果を図 3 に示す。図 3 は回転と並進について各試行における真値と推定値をプロットしたグラフである。図 3(a) は横軸が試行、縦軸が回転のグラフであり、3 軸周りの回転に関する真値と推定値の合計 6 種類の値を図示している。図 3(b) は横軸が試行、縦軸が並進のグラフであり、3 軸方向並進の真値と推定値の合計 6 種類の値を図示している。図 3 よりすべての値に関して推定値と真値が一致していることが確認でき、提案手法により高精度で 6 自由度の推定ができていることを確認した。

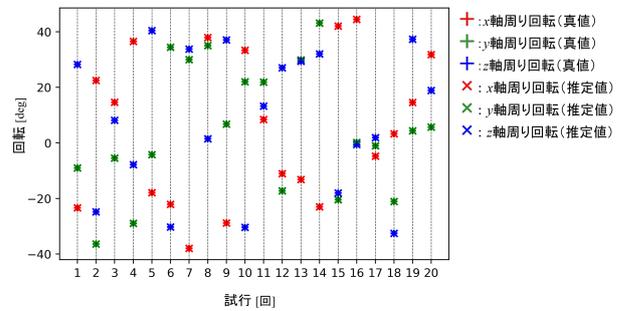
実験結果を定量的に評価するために、結果に示した回転および並進の 6 パラメータについて全試行で誤差平均を計算した。回転は  $10^{-9}$  deg、並進は  $10^{-7}$  mm 以下の誤差となり、定量的にも高い精度で推定ができていたことを確認した。

以上の結果から、提案手法により高い精度で 6 自由度の運動推定が可能であることを検証した。

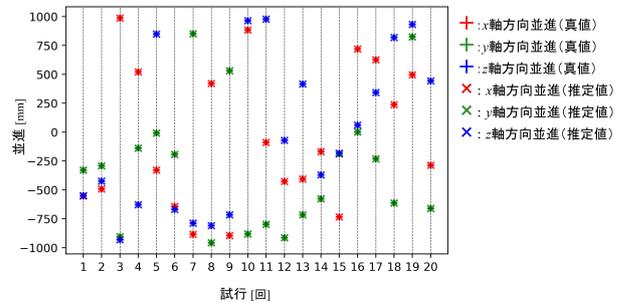
### 3.2 提案システムによる 3 次元計測実験

続いて、提案システムによる 3 次元計測のシミュレーション実験を行った。円筒内部に提案システムの断面計測部とアンカー部を設置して運動させた場合に、円筒面と各レーザ光線の交点のカメラ画像への投影をシミュレートした。カメラ画像に投影された各レーザの 2 次元点の時系列情報から各時刻における装置の位置・姿勢を推定し、3 次元形状を復元可能か検証を行った。

円筒の半径は 2500 mm に設定し、アンカー部のスポットレーザは 3.1 節の配置を利用した。断面計測部とアンカー部の初期位置の 3 次元座標をそれぞれ (0, 0, 0),



(a) 各軸周りに回転の推定値と真値



(b) 各軸方向並進の推定値と真値

図 3 提案手法による運動推定結果

(0, 0, 2500) とした。断面計測部が (0, 0, 10) の並進運動を 5 回行った後に、アンカー部が (0, 0, 50) の並進運動を 1 回行う運動を 1 サイクルとして、200 サイクルの運動を行った。各時刻に取得したカメラ座標における各レーザの投影点を入力として、提案手法により 3 次元計測を行い、リングレーザによる照射点の座標を 3 次元点群として出力した。

3 次元点群の真値と提案手法による計測結果を図 4 に示す。図 4(a) に示す真値と図 4(b) に示す推定値の点群結果から提案手法により大域的な 3 次元形状が取得できていることを確認した。定量評価として、真値と推定値の各点のユークリッド距離の平均値を誤差として計算したところ、212.5 mm であった。

## 4. 結論

本稿では、トンネルなどの大型構造物を対象とした移動 3 次元計測のための運動推定手法を提案した。2 種類の異なる配置で構成されるスポットレーザにより環境中に特徴点を生成することで、環境特徴に左右されずに 1 台のカメラのみで計測装置の 6 自由度運動推定が可能なる手法を提案した。また、カメラを含む断面計測部と、スポットレーザから構成されるアンカー部の移動方法に常に一方が静止するという制約を与えることにより、提案手法を大域的な位置・姿勢推定に活用することができることを示した。

シミュレーション実験により、提案したカメラとスポットレーザの間の位置・姿勢推定の有効性、および 3 次元計測システムの性能の評価を行った。位置・姿勢推定実験では提案手法により、サブミリ精度の正確な運動推定が可能であることを検証した。

3 次元計測実験では、半径 2500 mm、奥行き 10000 mm の長尺構造物の計測シミュレーションを行っ

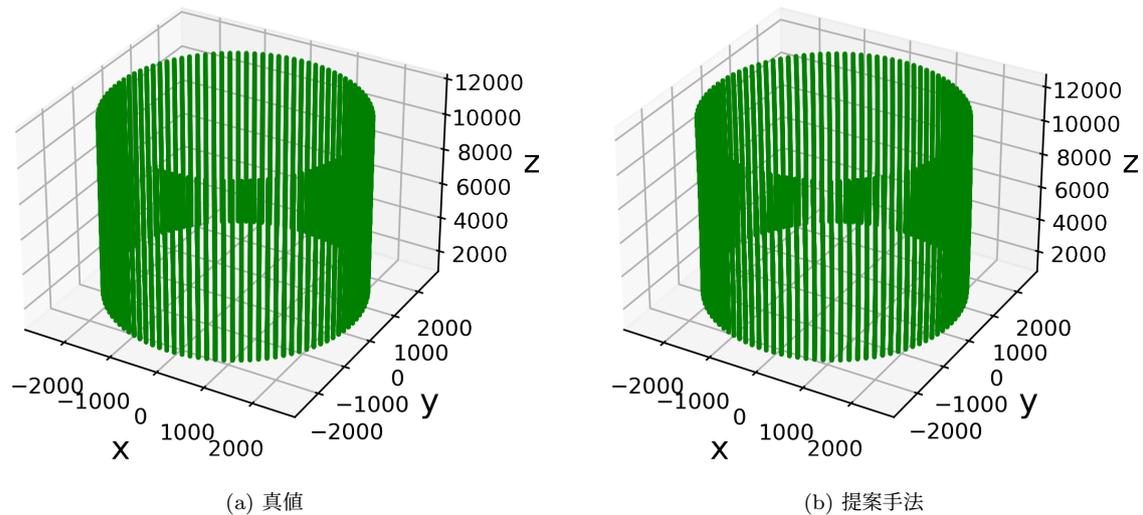


図4 真値と提案手法による3次元計測結果

た。出力点群を真値と推定値で比較することにより、平均誤差 212.5 mm の精度で計測が可能であることを確認した。

今後の展望は3次元計測精度の向上と提案した3次元計測システムの実機への実装である。

#### 参 考 文 献

- [1] B. Zheng, O. Takeshi, and I. Katsushi: “Rail Sensor: A Mobile Lidar System for 3D Archiving the Bas-reliefs in Angkor Wat”, *IPSN Transactions on Computer Vision and Applications*, vol. 7, pp. 59–63, 2015.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 伊賀上 卓也, 樋口 寛, 井倉 幹大, 吉田 健一, 伊藤 哲, 谷口 信博, 山下 淳, 浅間 一: “リングレーザ照射光の2D-3Dマッチングに基づく光切断法によるトンネル内部の3次元計測”, *精密工学会誌*, vol. 87, no. 12, pp. 987–994, 2021.
- [5] D. Nistér: “An Efficient Solution to the Five-point Relative Pose Problem”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 26, no. 6, pp. 756–770, 2004.