

光切断法による断面形状計測とスポットレーザ投光情報を用いた 位置・姿勢推定による長尺構造物内部の3次元計測

○樋口寛 †, 浅間一 †, 安琪 †, 山下淳 †

○ Hiroshi HIGUCHI †, Hajime ASAMA †, Qi AN †, and Atsushi YAMASHITA †

†: 東京大学, {higuchi, asama, anqi, yamashita}@robot.t.u-tokyo.ac.jp

長尺構造物内部の3次元計測では、複数の地点で計測した局所的な形状の統合による大域的な計測が行われる。本研究では統合に必要とされる特徴が乏しい環境における計測手法を提案する。提案システムでは、カメラとリングレーザから構成される断面計測部と、スポットレーザ光を投光可能なアンカー部を環境中で独立に移動させる。アンカー部が生成する特徴量を利用して断面計測部の位置・姿勢を推定することにより、断面計測部による局所断面形状を環境特徴を利用することなく統合する。

<キーワード> 3次元計測, 光切断法, 位置・姿勢推定, 長尺構造物

1 序論

近年、製造や点検を目的として様々な分野で計測の自動化が進められており、大型構造物に関しても同様の要求がある。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一般的である。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、単純に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。つなぎ合わせに必要となる装置の位置・姿勢推定には特徴量が手がか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

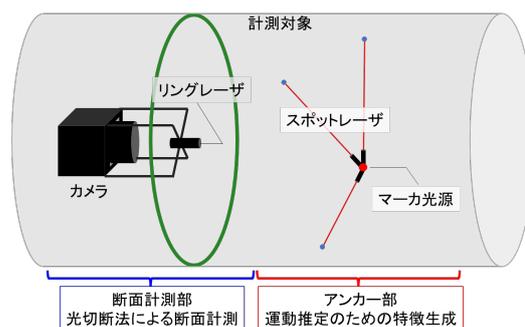


図1 提案システムの模式図

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構築を目的とする。

2 提案手法

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種類の装

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3本のスポットレーザとマーカ光源を搭載し、断面計測部の位置・姿勢を推定するための特徴を生成する。3本のスポットレーザはレーザ光線が1点で交わり、かつ任意の2本のレーザ光線が直交するように配置する。マーカ光源はカメラから直接観測できるように3本のスポットレーザの交点に設置する。

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。時刻 (i, j) における断面計測部とアンカー部の座標系をそれぞれ $\Sigma_{C(i,j)}$, $\Sigma_{L(i,j)}$ とする。ただし、 $\Sigma_{C(i,j)}$ と $\Sigma_{L(i,j)}$ の原点はそれぞれの原点はカメラ原点、アンカー部スポットレーザの交点と一致とする。

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 光切断法による断面形状計測

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

時刻 (i, j) の画像上で観測されるリングレーザの k 番目の2次元点の光線ベクトルを $\hat{\mathbf{p}}_{(i,j,k)}$ ($k = 0, 1, 2, \dots, o_{(i,j)} - 1$) とする。ただし、 $o_{(i,j)}$ は時刻 (i, j) において計測されるリングレーザ点群の総数である。カメラ原点からリングレーザの張る平面へ下ろした垂線の足の位置ベクトル \mathbf{n} が事前に外部パラメータとしてキャリブレーションされているとする。計測点はレーザが張る平面上に存在するため、時刻 (i, j) の k 番目の計測点のカメラ座標系における3次元座標 ${}^{C(i,j)}\mathbf{p}_{(i,j,k)}$ は下記の式により得られる。

$${}^{C(i,j)}\mathbf{p}_{(i,j,k)} = \frac{\|\mathbf{n}\|^2}{\mathbf{n}^\top \hat{\mathbf{p}}_{(i,j,k)}} \hat{\mathbf{p}}_{(i,j,k)}. \quad (1)$$

2.2 スポットレーザ情報に基づく位置・姿勢推定

全体の形状を復元するために各時刻で計測される断面計測結果を統一された同一の座標系へ変換する必要がある。本手法では、座標系 $\Sigma_{C(0,0)}$ への座標変換行列を推定する。

まず、既知のスポットレーザ間の配置と画像上のスポットレーザ光およびマーカ光源の2次元座標から、同時刻の断面計測部とアンカー部の間の位置・姿勢関係を推定する。ただし、原理的にスケールの不定性が存在するため、スケールを除く5自由度の位置・姿勢を推定する。すなわち、断面計測部とアンカー部の座標原点間の距離を1とみなした場合の座標変換 ${}^{C(i,j)}\hat{\mathbf{T}}_{L(i,j)}$ を求める。

${}^{C(i,j)}\hat{\mathbf{T}}_{L(i,j)}$ が下式に示すように回転変換 \mathbf{R} と単位並進ベクトル $\hat{\mathbf{t}}$ から構成されるとする。

$${}^{C(i,j)}\hat{\mathbf{T}}_{L(i,j)} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \hat{\mathbf{t}} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

単位並進ベクトル $\hat{\mathbf{t}}$ はマーカ光源の2次元点から光線ベクトルとして求めることが可能である。続いて、回転変換 \mathbf{R} について考える。アンカー座標系におけるスポットレーザの光線ベクトルは配置より、 $[1, 0, 0]^\top$, $[0, 1, 0]^\top$, $[0, 0, 1]^\top$ (それぞれ \mathbf{e}_0 , \mathbf{e}_1 , \mathbf{e}_2 とする) と表現できる。カメラ画像から観測される対応するスポットレーザの光線ベクトルを \mathbf{r}_0 , \mathbf{r}_1 , \mathbf{r}_2 とする。図2に示すように、単位並進ベクトル $\hat{\mathbf{t}}$ とカメラ光線ベクトル \mathbf{r}_k , 及びスポットレーザ光線ベクトル \mathbf{e}_k は同一平面上に存在するため、エピポーラ拘束より下式が成立する。

$$\mathbf{r}_k^\top [\hat{\mathbf{t}}]_\times \mathbf{R} \mathbf{e}_k = 0 \quad (k = 0, 1, 2). \quad (3)$$

ただし、 $[\hat{\mathbf{t}}]_\times$ は単位並進ベクトル $\hat{\mathbf{t}}$ の歪対称行列とする。式(3)により3個の式が与えられるため、回転行列の正規直交条件により得られる6個の式と合わせて、合計9個の式が得られる。よって、これらの方程式を解くことにより回転行列 \mathbf{R} を構成する9個の未知数を決定することが可能である。

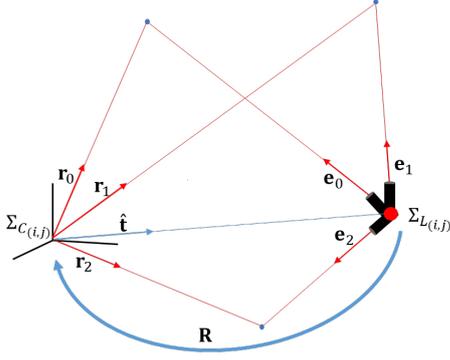


図2 カメラとスポットレーザの関係

以上より、座標変換 ${}^{C(i,j)}\hat{\mathbf{T}}_{L(i,j)}$ が得られる。よって、カメラ原点とアンカー部原点の距離 $s(i,j)$ を用いて、実スケールの座標変換 ${}^{C(i,j)}\mathbf{T}_{L(i,j)}$ は下式で表せる。

$${}^{C(i,j)}\mathbf{T}_{L(i,j)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & s(i,j) \\ 1 & 1 & 1 & s(i,j) \\ 1 & 1 & 1 & s(i,j) \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * {}^{C(i,j)}\hat{\mathbf{T}}_{L(i,j)}. \quad (4)$$

さらに、カメラとアンカーの距離を1とした場合のアンカー座標系におけるスポットレーザ点の3次元座標 ${}^{L(i,j)}\hat{\mathbf{q}}_{(i,j,k)}$ ($k=0,1,2$) は座標変換 ${}^{C(i,j)}\hat{\mathbf{T}}_{L(i,j)}$ と光線ベクトル \mathbf{r}_k , \mathbf{e}_k から三角測量により求めることができる。これらの3次元点の原点からのユークリッド距離の平均値を $\bar{d}(i,j)$ とする。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、スポットレーザ点は変化しないため、距離も一致する。したがって、下式が成立する。

$$s(i,j)\bar{d}(i,j) = s(i,0)\bar{d}(i,0). \quad (5)$$

よって、 $v_i := s(i,0)$ とすると、式(4)は下記のように1変数 v_i のみを未知パラメータとする関数 $\mathbf{F}(i,j)(v_i)$ として表現できる。

$${}^{C(i,j)}\mathbf{T}_{L(i,j)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \frac{\bar{d}(i,0)}{\bar{d}(i,j)}v_i \\ 1 & 1 & 1 & \frac{\bar{d}(i,0)}{\bar{d}(i,j)}v_i \\ 1 & 1 & 1 & \frac{\bar{d}(i,0)}{\bar{d}(i,j)}v_i \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * {}^{C(i,j)}\hat{\mathbf{T}}_{L(i,j)} \\ := \mathbf{F}(i,j)(v_i). \quad (6)$$

運動の制約より $\Sigma_{L(i,j)} = \Sigma_{L(i,0)}$ が成立するため、 ${}^{C(i,0)}\mathbf{T}_{C(i,j)}$ も1変数 v_i のみを未知パラメータとする

関数 $\mathbf{G}(i,j)(v_i)$ として表現できる。

$${}^{C(i,0)}\mathbf{T}_{C(i,j)} = \mathbf{F}(i,0)(v_i) \mathbf{F}(i,j)(v_i)^{-1} \\ := \mathbf{G}(i,j)(v_i). \quad (7)$$

したがって、座標変換 ${}^{C(0,0)}\mathbf{T}_{C(i,j)}$ は $\Sigma_{C(i,m_i)} = \Sigma_{C(i+1,0)}$ が成立するため、下記のように (v_0, \dots, v_i) をパラメータとする関数 $\mathbf{H}(i,j)(v_0, \dots, v_i)$ として表現できる。

$${}^{C(0,0)}\mathbf{T}_{C(i,j)} = \mathbf{G}(0,m_0)(v_0) \\ \mathbf{G}(1,m_1)(v_1) \\ \dots \\ \mathbf{G}(i-1,m_{i-1})(v_{i-1}) \\ \mathbf{G}(i,j)(v_i) \\ := \mathbf{H}(i,j)(v_0, \dots, v_i). \quad (8)$$

2.3 スケール決定と断面形状のつなぎ合わせ

各時刻の断面形状を統合するには式(8)におけるスケールパラメータ (v_0, \dots, v_{n-1}) を決定する必要がある。

式(8)を利用して、光切断法による計測点 ${}^{C(i,j)}\mathbf{p}_{(i,j,k)}$ を $\Sigma_{C(0,0)}$ 座標系に変換すると、

$${}^{C(0,0)}\mathbf{p}_{(i,j,k)} = \mathbf{H}(i,j)(v_0, \dots, v_i) {}^{C(i,j)}\mathbf{p}_{(i,j,k)}. \quad (9) \\ (0 \leq i < n, 0 \leq j < m_i, 0 \leq k < o(i,j))$$

運動推定時に計測したスポットレーザの実スケールの3次元座標は ${}^{L(i,0)}\hat{\mathbf{q}}_{(i,0,k)}$ となるため、 $\Sigma_{C(0,0)}$ 座標系に変換すると、

$${}^{C(0,0)}\mathbf{q}_{(i,0,k)} = \mathbf{H}(i,j)(v_0, \dots, v_i) {}^{L(i,0)}\hat{\mathbf{q}}_{(i,0,k)}. \quad (10) \\ (0 \leq i < n, 0 \leq k < 3)$$

各スポットレーザ点 ${}^{C(0,0)}\mathbf{q}_{(i,0,k)}$ の最近傍点をすべてのリングレーザ点群

$$\{ {}^{C(0,0)}\mathbf{p}_{(i,j,k)} \mid 0 \leq i < n, 0 \leq j < m_i, 0 \leq k < o(i,j) \}$$

から探索した場合の最近傍距離を $e_{(i,k)}(v_0, \dots, v_i)$ とする。スポットレーザ点群と光切断法による計測点群は同一の静的な計測対象面上の点群であるため、正しいスケールが与えられた場合、下式の最近傍距離の総和

$E(v_0, \dots, v_{n-1})$ は最小となる.

$$E(v_0, \dots, v_{n-1}) = \sum_{\substack{0 \leq i < n \\ 0 \leq k < 3}} e_{(i,k)}(v_0, \dots, v_i). \quad (11)$$

したがって, $E(v_0, \dots, v_{n-1})$ を評価関数として, (v_0, \dots, v_{n-1}) を最適化することにより, スケールを決定することができる.

最適化したスケールパラメータを式 (9) に代入することにより, 任意の時刻の断面計測結果を統一座標系に変換でき, 大域的な 3 次元形状を得る.

3 シミュレーション実験

提案手法の有効性を検証するため 3 次元計測のシミュレーション実験を行った.

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, 緑色リングレーザ 1 本を使用した. リング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. 本実験では平面上に 1 deg 刻みで放射状にレーザ光線を照射する 360 本のスポットレーザの集合としてリングレーザを模擬した. アンカー部には 3 本のスポットレーザを 1 点で交わるように配置し, 各レーザが残り 2 本のレーザと直交するように配置した.

初期時刻 (0,0) における各装置の配置を図 3 に示す. カメラを青色, リングレーザを緑色, スポットレーザを赤色で示した.

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.

計測の入力となる各レーザの 2 次元座標は, 各時刻におけるレーザ原点位置と光線方向から計測対象面とレーザの交点を計算し, 交点を同時刻のカメラ画像に投影することにより取得した. カメラ画像投影時には撮影時の量子化誤差を模擬するために, 画像座標が整数値となるように四捨五入した値を利用した.

実験結果を図 4 に示す. 図 4(a) にシミュレーションの真値とした 3 次元点群を, 図 4(b) に提案手法により計測した 3 次元点群を示す. 各結果について光切断法によるリングレーザ点群とアンカー部のスポットレー

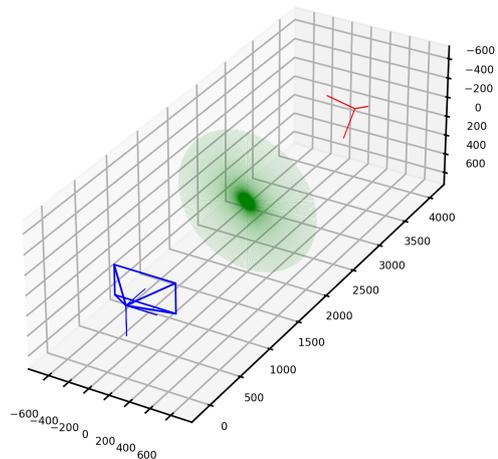
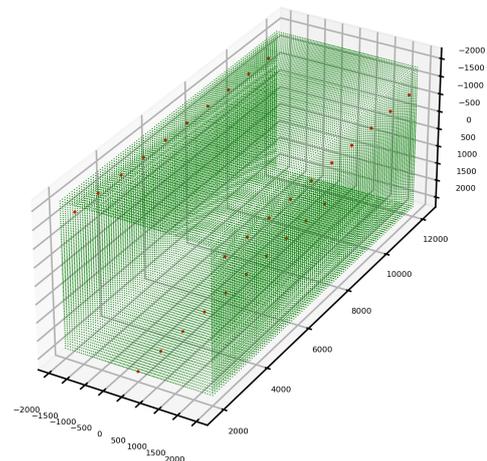
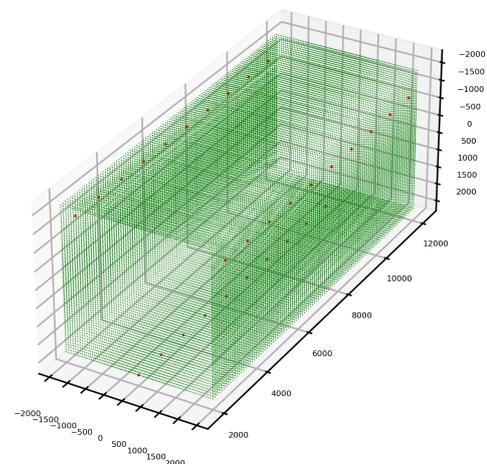


図 3 各装置の初期配置



(a) 真値



(b) 提案手法

図 4 真値と提案手法による 3 次元計測結果

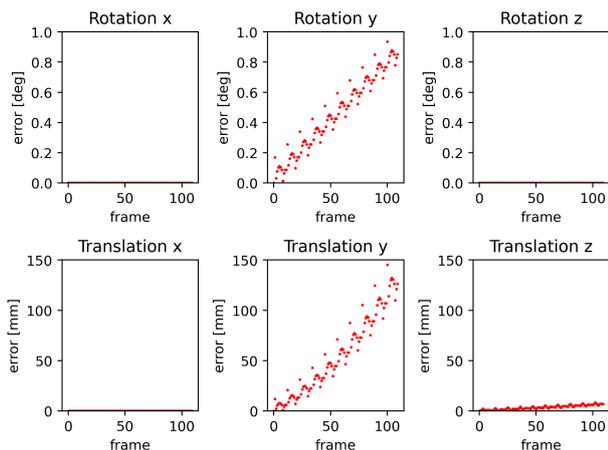


図 5 位置・姿勢推定結果の時系列誤差

ザ点群を、それぞれ緑色と赤色の点群で表示した。計測結果より、直方体の形状を実スケールで復元できることを確認した。また、提案したスケールの最適化手法により、リングレーザ点群が構成する面上にスポットレーザ点群が位置するようにスケールが決定されることを確認した。

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 7.19 mm、標準偏差 12.4 mm となった。誤差の原因を解析するために、各時刻における断面計測部座標系の位置・姿勢の推定値と真値との誤差を計算した結果を図 5 に示す。図 5 は横軸に入力画像のフレーム、縦軸に真値と推定値の誤差を示している。上段は x, y, z 軸周りのオイラー角の誤差を deg 単位で、下段は x, y, z 軸方向の並進移動量の誤差を mm 単位で示している。結果より、 y 軸周りの回転、及び y 軸方向の並進の誤差が他の軸と比較して大きいことが確認できた。本実験では z 軸方向への並進移動量が大きいため、 x 軸と y 軸周りの回転誤差が x 軸と y 軸方向の並進誤差をそれぞれ増幅させる。図 5 における y 軸方向の並進の誤差も y 軸周りの回転誤差が増幅された結果と考えられる。量子化誤差の影響により、連続したフレーム間で発生した回転誤差が一方に累積された結果、 y 軸方向への大きな並進誤差を与えたと考えられる。提案手法では回転の推定に同時刻のカメラとスポットレーザの関係のみを利用したが、異なる時刻の画像間で得られる対応関係を考慮するなどのアルゴリズムの改良により誤差の累積を低減できる可能性がある。

4 結論

本稿では、トンネルなどの大型長尺構造物を対象とした 3 次元計測手法を提案した。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 台のカメラとリングレーザによる光切断法の断面計測形状を統合可能な手法を提案した。シミュレーション実験により、提案手法の有効性を確認した。

今後の展望は累積誤差の低減と回転を含む運動に対する提案手法の有効性の検証である。

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] 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] T. Igaue, T. Hayamizu, H. Higuchi, M. Ikura, K. Yoshida, S. Yamanaka, T. Yamaguchi, H. Asama, and A. Yamashita: “Cooperative 3D Tunnel Measurement Based on 2D–3D Registration of Omnidirectional Laser Light”, *Journal of Field Robotics*, vol. 40, no. 8, pp. 2042–2056, 2023.