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 * 伊賀上卓也** 樋口 寬** 井倉幹大**

吉田健一 *** 伊藤 哲 *** 谷口信博 *** 山下 淳† 淺間 一†

Line Structured Light-Based Tunnel 3D Measurement with 2D-3D Point Cloud Matching on Projected Light of Ring Laser

Takuya IGAUE, Hiroshi HIGUCHI, Mikihiro IKURA, Kenichi YOSHIDA, Satoshi ITO, Nobuhiro TANIGUCHI, Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA

In this study, light structured light-based tunnel 3D measurement instrument without using background texture of camera images is proposed. 3D point clouds of tunnel cross sections are actively measured by a camera and a ring laser in one shot. To integrate coordinates of the measured cross sections without using background texture of camera images, an additional camera is used in the proposed instrument. To estimate positions and orientations of the cross sections by acquired images from the additional camera, a probabilistic 2D-3D point matching algorithm is proposed. For accuracy validation, a 3D measurement experiment was done in a tunnel. The result shows that coordinates of all the cross sections were properly integrated and a dense 48 m-long tunnel point cloud was achieved.

Key words: line structured light, tunnel 3D measurement, 2D-3D matching

1. 序 論

トンネルの安全性評価や施工効率化を目的とし,トンネル施 工状態の評価が行われている.その一環として,現在までに3 次元計測されたトンネル形状を,変形検知や品質評価に応用す る研究が数多く行われてきた^{1)~6)}.その際,変形や欠陥を正 確に捉えるために取得データが高精度,高密度な点群である ことが重要である.さらに,施工途中のトンネル計測において は,施工効率を低下させず計測を行うために,短時間により多 くの3次元座標を取得することが望まれている.

現在,屋外環境における最も一般的な3次元計測手法はトー タルステーションである^{1)~3)}.トータルステーションには, 照射したレーザの照射光と反射光の位相変化から測距を行う 光波測距方式と、パルス光の往復時間から測距を行う Time of Flight 方式が存在する. また,近年では,計測地点にプリズム を設置することなく計測が可能なノンプリズム式トータルス テーションも数多く開発されている. トータルステーションは 屋内屋外問わず高精度な3次元計測手法であるが,同時に計測 可能な座標は1点のみであるため、多点の計測を行うためには 長時間を要する. その問題を解決するための密な点群計測手法 として、レーザスキャナがある4)~6).レーザスキャナはトー タルステーション同様の光波測距方式の点計測を,1つの地点 から全方位に向け行うことで広範囲の3次元形状を取得する. また、全方位の計測が自動化されることで計測が高速化されて いる.ところが、同時に計測する点数は依然として1点のみで あるため、広範囲を密に走査するためには依然として多くの時 間を要する.

*	原稿受付	令和3年5月13	日
---	------	----------	---

- 掲載決定 令和3年8月19日 ** 営生会員 東京士営士営営(東
- ** 学生会員 東京大学大学院(東京都文京区本郷 7-3-1)



Fig. 1 Principle of line structured light-based 3D measurement

一方で、多点の3次元計測を高速に行うことができる手法 として光切断法^{7)~11)}がある.光切断法は直線状に光が照射 されるラインレーザとカメラを用いた3次元計測手法であり, レーザ光の進行方向とカメラの光線ベクトルの3角測量により 幾何的に 3 次元計測を行う (図 1). さらに, 360 度にレーザ 光を照射し構造光を形成することで,一度の撮影で構造物内部 の1断面分の計測が可能である $^{8)\sim11)}$. Zhan $6^{8)}$ は,複数の ラインレーザと複数のカメラを組み合わせることで 360 度に 対し光切断法を行い,鉄道トンネル内の3次元計測を行った. そして、トンネルー定区間における3次元点群生成のために、 車両に設置したオドメータから計測装置の移動量を推定し、計 測断面同士の座標系の統合を行った. また, Farahani ら¹¹⁾は, 円錐状に 360 度方向にレーザ光を照射し、トンネル模型内の 3次元計測を行った.そして,計測断面の座標系を統合するた めに,一定速度で移動可能なレール上で計測を行い計測装置の 移動量を決定した. Zhan らや Farahani らが行った計測断面の 座標系統合手法は、滑らかなカーブを描くレールが整備される 鉄道トンネルにおいては有用な手法である. ところが, 施工途 中のトンネルは不整地であり, 地盤の状態に依存してオドメー タにより推定された移動量や,計測装置の移動速度が変動す る. これにより、オドメータによる移動量推定において誤差が

[†] 正 会 員 東京大学大学院



発生することや、一定速度で計測装置を移動させることができ ないことが問題となる.また,樋口ら¹⁰⁾は,屋内通路におい て、レーザが平面状に照射されるリングレーザを用い、360度 の3次元計測を複数断面にわたり行った.そして,壁面のテ クスチャを利用したバンドル調整により装置の移動量を推定す ることで,計測断面の座標統合を実現した.樋口らの手法は, 車両とレールの相互作用によって生じる移動推定誤差が発生し ないため、不整地においても移動量の推定が可能である. とこ ろが、高精度な移動量推定のためには壁面に十分な特徴的な模 様が必要であり、トンネルのようにテクスチャの少ない環境で は移動量推定に失敗する恐れがある.そこで、本研究ではトン ネル壁面のテクスチャの代わりに照射レーザ光のパターンを位 置姿勢推定の特徴として利用することで、テクスチャの少ない 環境においても計測断面点群の座標系統合を可能にする. そし て、トンネルの内部広域の3次元計測を高精度に行うことを目 的とする.

2. 提案 手法

提案手法の概略図を図2に示す.図2(a)に示すように,計 測装置は2台の装置から構成される.1台は,魚眼カメラ(計 測カメラ)とリングレーザを一定距離だけ離して固定した断面 計測装置であり,もう1台は魚眼カメラ(観測カメラ)である. 本手法では,断面計測装置を移動させながら光切断法による3 次元計測を行うことで,1断面分の3次元形状を多断面分計測 する.このとき,レーザのオン・オフを切り替えながら計測を 行うことで,背景の影響を低減した光切断法を行う.また,光 切断法による断面計測装置を小型化するためには,構成要素で あるカメラとレーザの距離を近づけることが必要である.とこ ろが,この距離を近づけすぎると,通常視野のカメラでは360 度全方向に照射されているレーザ光を撮影することができな い.そこで,提案手法では,魚眼カメラを用いることでカメラ とレーザの距離が近い場合でも広範囲のレーザ光を撮影可能に する.

計測断面点群の座標系統合では、断面計測装置の後方に設置 した観測カメラから壁面に照射されたレーザ光を撮像する.そ の後,光切断法により3次元形状が計測された照射レーザ光を 利用し,計測断面の位置姿勢変化を推定する.これにより,壁 面のテクスチャを利用しない計測断面の座標系統合が可能とな る.また,光切断法におけるリングレーザ光の大部分が観測カ メラから撮影できなくなると,計測断面の位置姿勢推定が困難 となる.そこで,計測装置を一定距離移動させたのち,断面計 測装置を停止させた状態で観測カメラを断面計測装置に近づけ ることで位置姿勢推定精度の低下を抑制する.

2.1 リングレーザを用いた光切断法

2.1.1 差分画像の取得

リングレーザを用いた光切断法では、壁面に写ったレーザ光 を撮影した画像から光線ベクトルを算出する.撮影画像に対す る前処理として、レーザ光を照射したときと照射しないときの 差分画像を取得し、背景の輝度を除去する.ここで、レーザの スイッチングの間に装置が移動し、背景が変化することで、差 分画像にレーザ光以外の物体が現れる.その結果、レーザ光の 画像座標を算出することが困難になる.そこで、本手法では、 背景画像に対しガウシアンフィルタを適用したのち輝度を高め ることで、背景の影響が差分画像中に現れることを抑制する.

2.1.2 3次元座標の算出

図2(b)に示すように、リングレーザから照射される光は平面上にレーザ光を形成する.このレーザ光が張る平面を本研究ではレーザ平面と定義する.レーザ平面とできるだけ垂直になるようにカメラを固定すると、壁面に照射されたレーザ光が画像の中央付近を中心とした360度方向に撮像される.そのため、放射状に輝度が高い点を抽出することで、ある1点のレーザ光の画像座標を算出することができる.そして、その座標算出を一定角度ごとに行うことで、360度全方向において放射状にレーザ光の画像座標を算出する.

ある角度 θ におけるレーザ光の画像座標 (u_{θ}, v_{θ}) 算出の概略 図を図**3**に示す.角度 θ におけるレーザ光の画像座標算出で は、まず画像中心 (u_c, v_c) から角度 θ の半径方向の領域を時計 回りに回転させる.続いて、回転後の画像上で画像中心から右 方向に沿って次式の輝度重み付き重心を算出することで、回転 されたレーザ光の画像座標 $(u'_{\theta}, v'_{\theta})$ を決定する.

$$(u_{\theta}', v_{\theta}') = \left(\sum_{u=u_c}^{U} \frac{\alpha_u}{\sum_{u'=u_c}^{U} \alpha_{u'}} u, v_c\right)$$
(1)

$$\alpha_{u'} = \begin{cases} 0 & \text{if } f(u', v_c) < T \\ f(u', v_c) & \text{if } f(u', v_c) \ge T \end{cases}$$
(2)



ここで, f(u,v) は座標 (u,v) における輝度値, U は画像の横幅, T は背景の輝度の影響を抑制するための閾値である. そして, 回転された画像上でのレーザ光の画像座標を反時計回りに θ だけ再回転させることで, 原画像におけるレーザ光の画像座 標 (u_{θ}, v_{θ}) を算出する. 画像回転におけるピクセル間の補間は バイリニア補間により行う.

提案手法では,魚眼カメラを用いることでカメラとレーザの 距離が近い場合でも広範囲のレーザ光を撮影可能にする.画像 座標から光線ベクトルを導出する際に利用する魚眼カメラのモ デルとして, Mei らのカメラモデル¹²⁾を用いる.カメラ内部 パラメータを用いて歪みを取り除いた光線ベクトル導出し,次 式でレーザ光が照射されている3次元座標yを求める.

$$\mathbf{y} = s_{\ell} \mathbf{r},\tag{3}$$

$$\mathbf{n}^{\mathsf{T}}(\mathbf{y} - \mathbf{n}) = 0, \tag{4}$$

ここで, \mathbf{r} はカメラモデルから導出した光線ベクトル, s_{ℓ} は光 線ベクトルをスケーリングする実数, \mathbf{n} は計測カメラ原点から レーザ平面に向かう垂線ベクトルである.

2.1.3 魚眼カメラとレーザ平面のキャリブレーション

光切断法を実行するためには,事前にカメラの内部パラメー タとリングレーザ光への垂線ベクトル n が既知である必要が ある.はじめに,魚眼カメラの歪みパラメータ,及び歪みを取 り除いたカメラモデルの内部パラメータ推定を,幾何情報が既 知のチェッカーボードを用いて行う.その際,撮影されたボー ドのコーナー座標と画像平面上に投影した幾何点群の二乗誤差 を最小化することでカメラ内部パラメータを推定する.

続いて,式(4)の光切断法による3次元座標算出において用 いるレーザ平面への垂線ベクトルnについて,図4に示すよ うにキャリブレーションを行う.まず,内部パラメータ同定済 のカメラからチェッカーボードとその上に照射されたレーザ光 を複数箇所で撮影する.そして,事前に同定したカメラ内部パ ラメータを用い,それぞれの位置におけるチェッカーボードの 3次元座標を算出する.ここで,カメラ座標系からある1箇所 におけるチェッカーボード座標系への座標変換を回転行列 R, 並進ベクトルtで表すと,チェッカーボードに投影されたレー ザ光の画像座標から導出した照射レーザ光への光線ベクトルr について次式の関係が成立する.

$$\begin{bmatrix} 0\\0\\1 \end{bmatrix}^{\mathsf{T}} (s_{\ell} \mathbf{Rr} + \mathbf{t}) = 0.$$
 (5)

この式を s_{ℓ} について解くことで,式 (3) からある 1 箇所の チェッカーボード上に照射されたレーザ光の 3 次元座標を求め ることができる.そして,複数個所のチェッカーボードから算 出した全てのレーザ光の 3 次元点群から式 (4) を最小二乗法に より解くことにより n を推定する.



Fig. 4 Diagram of calibrating laser plane perpendicular vector n

2.2 リングレーザ照射光を利用した計測断面の統合

2.2.1 カメラ同士の位置姿勢関係を利用した断面統合

計測断面統合の概略図を図**5**に示す.提案手法による3次 元計測では, $c(c = 1, 2, \dots, C)$ サイクルにわたって計測区間 全体の3次元計測を行う.サイクル開始時の観測カメラと計測 カメラの距離を $d_1 \in \mathbb{R}$ ($d_1 > 0$),サイクルあたりの計測距離 を $d_2 \in \mathbb{R}$ ($d_2 > 0$)としたとき,サイクル cでは,次の操作を 行う.

- 1. 観測カメラを d₂(c-1) d₁の位置に移動させる.
- 観測カメラを環境中に固定した状態で、断面計測装置を d₂(c-1) から d₂c の位置へ移動させながら断面計測を 行う.

ここで,サイクル c での計測断面を s ($s = 1, 2, \dots, S_c$) と表 記する.また,それぞれの計測時点でカメラ座標系を区別する ため,サイクル c, s 断面目の計測 3 次元点群が属する座標系 を計測カメラ座標系 $\Sigma_{P_{c,s}}$,サイクル c における観測カメラ座 標系を Σ_{Q_c} とする.そして,計測カメラ座標系 $\Sigma_{P_{c,s}}$ で表さ れた 3 次元点群を Σ_{Q_1} に統一することを座標系統合とする.

サイクル c, s 断面目における m 番目の計測点 $\mathbf{y}_{c,s,m}$ は次 式により統一座標系 Σ_{Q_1} に変換される.

$${}^{Q_1}\mathbf{y}_{c,s,m} = {}^{Q_1}\mathbf{T}_{Q_2} \cdots {}^{Q_{c-1}}\mathbf{T}_{Q_c} {}^{Q_c}\mathbf{T}_{P_{c,s}} {}^{P_{c,s}}\mathbf{y}_{c,s,m}, \quad (6)$$

ここで, ${}^{B}\mathbf{T}_{A} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ は3次元点群を座標系 Σ_{A} から Σ_{B} へ 変換する同次変換行列である.また, ${}^{A}\mathbf{y}$ は,座標系 Σ_{A} にお ける計測点である.計測において,サイクル c-1, S_{c-1} 断面 目の計測直後からサイクル c, 1 断面目の計測までの間,観測 カメラを移動させる.そのとき計測カメラを環境中に固定した 状態にしておくことで,サイクル c, 1 断面目とサイクル c-1, S_{c-1} 断面目において計測点が一致する.したがって,次式の 同次変換が成立する.

$${}^{Q_{c-1}}\mathbf{T}_{Q_c} = {}^{Q_{c-1}}\mathbf{T}_{P_{c-1,S_c}}{}^{P_{c,1}}\mathbf{T}_{Q_c}.$$
 (7)

式 (7) を式 (6) に代入することで, $Q_c \mathbf{T}_{P_{c,s}}$ ($c = 1, 2, \cdots, C, s = 1, 2, \cdots, S_c$)が既知であるとき,全ての 3 次元点群を統一座標系 Σ_{Q_1} で表すことができる.

2.2.2 2D-3D マッチングによる座標系変換行列の推定

2.2.1 項より,計測断面の統合における $\Sigma_{P_{c,s}}$ に属する断面 形状を統一座標系 Σ_{Q_1} で表すための変換には $Q_c \mathbf{T}_{P_{c,s}}$ が既知 パラメータである必要がある.本手法では,サイクル c, s 断面 目における観測カメラで撮影されたレーザ光の画像座標と断面 計測装置で計測された 3 次元点群のマッチングにより $Q_c \mathbf{T}_{P_{c,s}}$ を推定する.また,レーザ光の画像座標や計測 3 次元点群には オクルージョンや誤検出から外れ値が発生する.したがって,



Fig. 5 Diagram of integrating coordinates of measured cross sections

提案手法では,両点群の対応無し 2D-3D マッチングにおいて, 確率的な点群マッチング手法による外れ値に頑健なマッチン グを行う. Myronenko ら¹³⁾は同次元の点群に対する確率的な 点群マッチング手法として,剛体変換における回転と並進を 推定する Rigid Coherent Point Drift を提案している.そこで, 提案手法では 2D-3D マッチングを行うために, Rigid Coherent Point Drift を拡張し,射影変換における回転行列,並進ベクト ルの推定を行う.

提案手法における 2D-3D マッチングの概略図を図 6 に示す. 観測カメラから 2.1.2 項と同様の手法でレーザ光の座標抽出 を行った 2 次元点群を $\mathcal{X} = \{\mathbf{x}_n \in \mathbb{R}^2, n = 1, 2, \dots, N\}$ とし, 断面計測装置で計測された 3 次元点群を $\mathcal{Y} = \{\mathbf{y}_m \in \mathbb{R}^3, m =$ 1,2,..., $M\}$ とする. \mathcal{Y} の 1 点 \mathbf{y}_m が \mathcal{X} の各点と対応する確 率を, \mathbf{y}_m を平均としたガウス分布でモデル化する. そして, \mathcal{X} が, \mathcal{Y} を観測カメラ平面に投影した座標をセントロイドと した混合ガウス分布に従うと仮定する. このとき \mathcal{X} を標本と して算出した \mathcal{Y} の尤度を, \mathcal{Y} に対し適用する回転行列,並進 ベクトルについて最大化することでマッチングを行う.

3次元点群を観測カメラ平面に投影した点群の確率密度関数 は、外れ値の出現確率を一様分布で表現した次式で表す.

$$p(\mathbf{x}) = w \frac{1}{N} + (1 - w) \sum_{m=1}^{M} \frac{1}{M} p(\mathbf{x}|m),$$
(8)

ここで、 $p(\mathbf{x}|m)$ は、M 個のガウス分布が足し合わされた混合 ガウス分布における m 番目のコンポーネント、w は一様分布 の重みを決定する定数である。そして、次式の負の対数尤度 $E(\boldsymbol{\theta}, \sigma^2)$ を回転行列 **R**、並進ベクトル **t** について最小化する.

$$E(\boldsymbol{\theta}, \sigma^2) = -\sum_{n=1}^N \log \sum_{m=1}^{M+1} p(m) p(\mathbf{x}|m), \tag{9}$$

ここで, M + 1番目のコンポーネントは一様分布を意味する. また, θ は 3 次元点群に対し適用する回転行列と並進ベクト ル. σ^2 は混合ガウス分布の各コンポーネントにおける共分散 行列の対角成分, p(m)は各コンポーネントの事前確率である.



負の対数尤度の最小化は EM アルゴリズムに基づき行う. EM アルゴリズムでは, E ステップで潜在変数の事後分布を導出し, M ステップでは Q 関数の最小化を行う. そして, 両ステップを収束するまで実行する.

2 次元平面 z = 1 に投影された 3 次元座標 \mathbf{y}_m を $\mathcal{T}(\mathbf{y}_m, \boldsymbol{\theta})$ と表すとき,射影変換は実数 s_h ,回転行列 **R**,並進ベクトル **t** を用いて次のように表される.

$$s_h \begin{bmatrix} \mathcal{T}(\mathbf{y}_m, \boldsymbol{\theta}) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}\mathbf{y}_m + \mathbf{t}.$$
 (10)

E ステップでは、標本として得られた 2 次元点群 \mathcal{X} が混合ガ ウス分布の各コンポーネントから生成された確率 $p^{\text{old}}(m|\mathbf{x}_n)$ を算出する.また、提案手法では、射影変換における回転・並 進を導出するために、M ステップでニュートン法に基づきパラ メータ \mathbf{R}, \mathbf{t} の最適化を行う.M ステップで最小化する目的関 数(Q 関数)は次式である.

$$Q(\boldsymbol{\theta}, \sigma^2) = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{M} p^{\text{old}}(m|\mathbf{x}_n) ||\mathbf{x}_n - \mathcal{T}(\mathbf{y}_m, \boldsymbol{\theta})||^2 + \frac{N_{\mathbf{P}}D}{2} \log \sigma^2, \qquad (11)$$

ここで、Rの最適化は、オイラー角から回転行列を生成し各軸 からの角度に対して行う.また、2D-3Dマッチングの初期値が 最適解と大きく異なる場合局所解へと収束する可能性があるた め、1 断面直前の R,tを最適化の初期値として設定する.以上 で求めた R,tを同次変換行列として表すことで $Q_c T_{P_{c,s}}$ を算 出する.

3. トンネル計測実験

3.1 方法

計測装置の精度評価として,道路トンネルに隣接する施工中 の避難坑に対する3次元計測実験を行った.トンネル径は約 5mであり,トンネル内部は図7に示すようにコンクリートが 吹き付けられた状態であった.トンネル坑内には施工用のレー ルが整備されており,計測ではレール上に装置を設置しトンネ ルの奥に向かって48mにわたり手動で移動させた.

実験に用いた3次元計測装置を図8に示す. 断面計測装置, 観測カメラに用いる魚眼カメラとして,Nikon Z7II に AF-S Fisheye NIKKOR 8-15 mm f/3.5-4.5E ED を装着したカメラを2 台用いた.カメラは59.94 fps で解像度3840×2160の動画を撮 影するように設定し,動画のシャッタータイミングは初期フ レームをリモートレリーズにより一致させた. 断面計測装置に



Fig. 7 Measurement scenery



Fig. 8 Cross-section 3D measurement equipment of the proposed method

おけるリングレーザと魚眼カメラの距離は約1.5mに固定し, 計測中は距離が変化しないようアルミフレームで固定した. レーザ光のオン・オフはカメラ fps の1/3 にあたる 19.98 回/s で行い,動画中で3フレームおきにレーザのオン・オフが撮影 されることを利用し差分画像の抽出を行った.レーザ座標の抽 出は計測カメラ画像,観測カメラ画像それぞれで 2000 分割, 500 分割し各角度に対し行った.2D-3D マッチングにおける一 様分布の重みは全ての断面統合において w = 0.5 に固定した.

精度検証のために4m間隔で13断面分,1断面あたり6箇 所マーカを設置し,比較対象としてマーカの3次元座標をトー タルステーション Nikon Nivo 5.SCL をノンプリズムモードに 設定し計測した.提案手法により計測された3次元点群からの マーカ座標抽出として,点群中に現れる直方体のマーカの中央 付近の計測点を選択した.

精度検証では、光切断法による断面計測の精度検証と、断面 統合の精度を評価した。断面計測の精度検証では、4m間隔で 計 13 断面計測を行い、断面ごとにマーカにおける計測誤差を 評価した。トータルステーションによる計測結果と提案手法に よる計測結果の座標系は断面ごとに最小二乗法により一致さ せた。断面統合の精度検証では、48mを一度に計測したとき のマーカにおける計測誤差を評価した。提案手法による計測 の1サイクルでは、サイクル開始時の観測カメラと計測カメラ の距離 d₁を約2mとした。また、サイクルあたりの計測距離 d₂は、約2m,4m,8mと3条件で変化させた。誤差算出では、 トータルステーションによる計測結果と提案手法による計測 果の座標系を全78点のマーカ座標について最小二乗法により 一致させた。



(a) No background subtraction



(b) With background subtraction Fig. 9 Extracted laser pixels from measurement camera image

3.2 結果と考察

3.2.1 光切断法による断面計測の精度検証

背景差分を行った場合と行わなかった場合についてレーザ光 の画像座標を算出した結果を図9に示す.提案手法の光切断法 では,輝度の高いピクセルを半径方向に走査することでレーザ 光を抽出している.そのため,背景差分を行わなかった図9(a) では,蛍光灯や,蛍光灯に照らされて輝度が高くなっている背 景がレーザ光の画像座標として誤って算出されている.一方, 背景差分を行った図9(b)では,レーザ以外の物体が除去され ており,蛍光灯下においても断面計測を行うことができてい る.これにより,提案手法では人が作業している間も,その側 の蛍光灯下で3次元計測可能であることが示された.

提案手法とノンプリズム式トータルステーションにより計測 した 13 断面のうち,1 断面分の3次元点群を図10に示す.両 手法による計測結果の座標系を一致させる際,最小二乗法によ り対応するマーカ同士の距離を最小化した.図10において, 提案手法では,1度の計測によって取得された点群であるにも かかわらず1479点の密な点群が取得されており,トンネルの 輪郭だけでなく換気用ダクトや配管,ケーブル等が確認でき る.また,360度方向全てに対し均一な3次元計測が実現され ており,トンネル形状を明確に確認することができる.

計測精度の定量的評価として,両手法間で計測したマーカ 間の距離を各断面ごとに平均し,13 断面についてその平均と 分散を算出した(表1).表1から,提案手法の計測誤差は, 18.36 mm であった.提案手法の3次元計測精度が低下した原 因として,魚眼カメラの内部パラメータキャリブレーションに おける誤差や,それに伴い生じるリングレーザ平面の算出誤差 が挙げられる.



Fig. 10 Measured cross section with the proposed cross-section measurement equipment

 Table 1 Mean and standard deviation of the distance for 13 cross section between the marker which measured with non-prism total station and the marker which measured with the cross-section measurement equipment

Mean mm	Standard deviation mm
18.36	8.27

3.2.2 断面統合を含めた3次元計測の精度検証

サイクルあたりの計測距離 $d_2 \ge 4 \le 4 \le 2$ 。 観測カメラを移動させながら提案手法により計測した場合の、断面統合された3次元点群を図11に示す.計測された点群は4335断面分約716万点であった.また、計測時間は、48mの区間に対し約10分であった.3次元座標の算出に要した時間は、実行環境 CPU Intel Core i7-8700K (3.70 GHz, 6 コア)、RAM 32 GB, OS Ubuntu のもとで、光切断法による断面計測と計測断面の統合を合計して15.2時間であった.図11では、48mのトンネル形状が確認でき、提案手法により環境中のテクスチャを利用せずに座標系統合が可能であることが示された.

提案手法は,初期値が最適解の回転行列,並進ベクトルから 大きく外れている場合,局所解に収束する可能性がある.その 一方,図 11 では,全ての断面で局所解に陥ることなく統合に 成功した.このことから,提案手法の 2D-3D マッチングによ り計測断面の座標系統合を行う際,直前の断面で推定された回 転行列,並進ベクトルに最適化の初期値を設定することで,よ りロバストな座標系統合を行うことができることが示された.

次に、図11の計測点群について、直方体マーカにおける誤 差を評価する.提案手法により計測した点群から手動で抽出し たマーカ座標とトータルステーションにより計測したマーカ座 標を図12に示す.それぞれの計測点群の座標系は、対応する マーカの二乗距離を最小化することで一致させた. 両手法によ る計測結果は近い形状となっており、提案手法により高精度な 計測断面の統合を行うことができた. また, 提案手法の点群は 徐々に曲がりながら断面統合されており、座標系統合における 累積誤差が発生した.提案手法では、観測カメラと断面計測装 置の2台構成で3次元計測を行っているため、1サイクルの間 であれば、断面計測装置が移動したとしても累積誤差を蓄積し ない. その一方, 異なるサイクル間では観測カメラを移動させ るため、計測断面が統合される観測カメラ座標系が変化するこ とにより累積誤差を蓄積する.その結果として、3次元点群中 に累積誤差が発生した.したがって,観測カメラの移動量推定 精度を向上させることで異なるサイクル間の累積誤差を低減で き、より高精度な3次元計測を行うことができるようになる可 能性がある.



Fig. 11 Measured 3D point cloud with the proposed method. Point color shows the value of z-axis



Fig. 12 3D point clouds of the rectangular marker measured with the proposed method and non-prism total station



Fig. 13 Distance from the proposed method to non-prism total station in case obsevation camera was moved every 2 m, 4 m and 8 m

3.2.3 観測カメラ移動間隔を変更した場合の精度検証

観測カメラの移動間隔を変更した場合の提案手法とトータル ステーションによる計測誤差を図13に示す.各ボックスは, サイクルあたりの計測距離 d2 を 2,4,8 m と変化させた場合に 計測されたトンネル3次元点群中のマーカ座標と、トータル ステーションによる計測マーカ座標の距離を, それぞれ 78 箇 所分について示している. また, マーカにおける誤差を求める 際,両手法の座標系はマーカについて最小二乗法により一致さ せた.図13から,提案手法ではどの移動間隔においても0.7m 程度の誤差が発生したことが示される. 観測カメラを移動させ る間隔が大きくなるにつれ累積誤差が蓄積される回数が減少し ているにもかかわらず、点群全体としての計測誤差がほとんど 低下しなかった. これは、観測カメラをより大きな距離間隔で 移動させることにより、1度の観測カメラ移動において蓄積す る誤差が大きくなったことを意味する. つまり, 観測カメラの 移動間隔を大きくすることにより、観測カメラの移動直前の 2D-3D マッチングによる断面計測装置と観測カメラの位置姿 勢推定において誤差が大きくなった.

断面計測装置と観測カメラの位置姿勢推定精度が低下した 原因を考察するために、1 サイクル目において断面計測装置が 0m 地点にある時刻と、8m 進行した地点にある時刻における 2D-3D マッチングの結果を評価する.両時刻における 2D-3D マッチングの結果を図 14 に示す.図 14 には、計測断面の3次 元点群を観測カメラ座標系における z = 1 平面に投影した結



(a) Result of 2D-3D matching when cross-section measurement equipment is at 0 m

(b) Result of 2D-3D matching when cross-section measurement equipment is at 8 m





(a) Image captured by Observation camera when cross-section equipment is at 0 m Fig. 15 Captured distorted image from observation camera at different measurement points

果と,観測カメラでの光線ベクトルを同座標系で z = 1 平面に 投影した結果をプロットしている.0m 地点に比べ,8m 地点 ではレーザ光の画像座標に欠けが多く,位置姿勢推定に利用で きる座標に偏りが生じた.これにより,偏った誤差の影響を受 け,位置姿勢推定誤差が大きくなった.また,提案手法では, 外れ値や欠けの多い8m 地点においても,取得された点群から 最適な2D-3Dマッチングを行うことができている.観測カメ ラから算出された光線ベクトルの事後確率は,射影変換された 2次元点群が形成する混合ガウス分布のうち,近傍のコンポー ネントに対して大きくなる.その結果,式(11)の重み付き二 乗誤差において近傍の点の重みが大きくなり,外れ値の影響を 低減しつつ,欠けの多い点群からも適切な最適化を行うことが できた.

続いて,断面計測装置が0m地点にある時刻と,8m進行した 地点にある時刻における観測カメラから撮影した画像を図15 に示す.図15において,0m地点ではレーザ光が360度全て の方向で明るく照射されている一方,8m地点では,画像の左 上,右下にレーザ光が写っていない箇所が生じた.したがっ て,観測カメラから算出された2次元点群における欠けは,画 像上でレーザ光の輝度が小さかったことに由来する.実験に用 いたリングレーザはレーザ光の強度が不均一であり,レーザ光 の画像座標の欠けに対応する箇所の輝度が低かった.そのた め、この問題は均一にコリメートされたレーザを利用すること で解決可能である.

4. 結 論

本論文では、魚眼カメラとリングレーザで構成される光切断 法により、トンネル内部の3次元計測を行った.そして、環境 中のテクスチャを利用しない計測断面統合を実現するために、 照射レーザ光について、環境中に設置した魚眼カメラ上で確率 的な2D-3Dマッチングを行い、断面計測装置の位置姿勢推定 を行う手法を提案した.トンネルにおける3次元計測実験で は、半径約5mのトンネル断面に対し、誤差が平均18.36mm、 分散8.27mmの光切断法による能動的な3次元計測を達成し た.さらに、壁面のテクスチャを利用しない座標系統合を全て の計測断面に対して行うことで、48mにわたるトンネルの密 な3次元計測を実現した.

今後の課題は、より正確な3次元計測を行うためのレーザ光 の画像座標算出とキャリブレーションの精度向上,及び多様な 断面形状に対する提案手法の有効性検証である.

謝 辞

本研究の一部は,国土交通省関東地方整備局技術シーズマッ チングの委託研究で行った.

参考文献

- J. Sharma, A. Hefny, J. Zhao and C. Chan: Effect of large excavation on deformation of adjacent mrt tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, 16, 2 (2001) 93.
- Y. Luo, J. Chen, W. Xi, P. Zhao, X. Qiao, X. Deng and Q. Liu: Analysis of tunnel displacement accuracy with total station, Measurement, 83 (2016) 29.
- J. Zhou, H. Xiao, W. Jiang, W. Bai and G. Liu: Automatic subway tunnel displacement monitoring using robotic total station, Measurement, 151 (2020) 107251.
- R. Van Gosliga, R. Lindenbergh and N. Pfeifer: Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning, Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium, XXXVI, 5 (2006) 167.
- D.-J. Seo, J. C. Lee, Y.-D. Lee, Y.-H. Lee and D.-Y. Mun: Development of cross section management system in tunnel using terrestrial laser scanning technique, Proceedings of the XXIst ISPRS Congress, XXXVII, B5 (2008) 573.
- V. Gikas: Three-dimensional laser scanning for geometry documentation and construction management of highway tunnels during excavation, Sensors, 12, 8 (2012) 11249.
- A. Duda, J. Schwendner and C. Gaudig: SRSL: Monocular selfreferenced line structured light, Proceedings of 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (2015)

717.

- D. Zhan, L. Yu, J. Xiao and T. Chen: Multi-camera and structuredlight vision system (MSVS) for dynamic high-accuracy 3D measurements of railway tunnels, Sensors, 15, 4 (2015) 8664.
- N. H. Maerz, J. Ibarra and J. A. Franklin: Overbreak and underbreak in underground openings part 1: Measurement using the light sectioning method and digital image processing, Geotechnical & Geological Engineering, 14, 4 (1996) 307.
- 10) H. Higuchi, H. Fujii, A. Taniguchi, M. Watanabe, A. Yamashita and H. Asama: 3D measurement of large structure by multiple cameras and a ring laser, Journal of Robotics and Mechatronics, **31**, 2 (2019) 251.
- 11) B. V. Farahani, F. Barros, P. J. Sousa, P. P. Cacciari, P. J. Tavares, M. M. Futai and P. Moreira: A coupled 3D laser scanning and digital image correlation system for geometry acquisition and deformation monitoring of a railway tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, **91** (2019) 102995.
- 12) C. Mei and P. Rives: Single view point omnidirectional camera calibration from planar grids, Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2007) 3945.
- A. Myronenko and X. Song: Point set registration: Coherent point drift, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 32, 12 (2010) 2262.