

光切断法による高精度 3 次元モデル生成のための リングレーザ照射光の 2D-3D マッチングに基づく計測断面統合

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†

† 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 ‡ 大林組生産技術本部トンネル技術部

E-mail: igaue@robot.t.u-tokyo.ac.jp

1 序論

トンネル管理の ICT 化に伴い施工・点検において 3 次元形状による管理の効率化や安全性向上が進められている。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が変形検知や品質評価に応用されてきた [1-3]。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ことに加え、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 次元座標を計測することが望まれている。

トンネル形状評価のための密な点群計測手法として、一般的に Terrestrial Laser Scanner (TLS) が用いられる。TLS は光波測距方式であり、照射したレーザの照射時と返戻時の位相のずれにより距離を計測する。さらに、1 つの地点で全方位に向け点計測を行うことで広範囲の 3 次元形状を取得する。TLS は屋内・屋外問わず高い精度で 3 次元計測可能であるが、点計測であるため多点の計測に多くの時間を要するという課題がある。

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がある。光切断法は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、スポットレーザではなく 360 度全方向にレーザを照射し平面状の光を形成するリングレーザを用いることで一度に多点の計測が可能である [4-6]。樋口ら [5] は、屋内環境において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、計測断面の座標系統合のために壁面のモノクロテクスチャを利用し、バンドル調整により装置の移動量を推定することで、単一の装置で計測断面の座標統合を実現した。ところが、この手法では壁面に十分なテクスチャが必要であり、使用可能な環境が制限されることが問題であった。そこで、本研究では光切断法による 3 次元計測時に生成されるレーザ照射光を利用し、壁面のテクスチャを用いず計測 3 次元点群の座標系を統合す

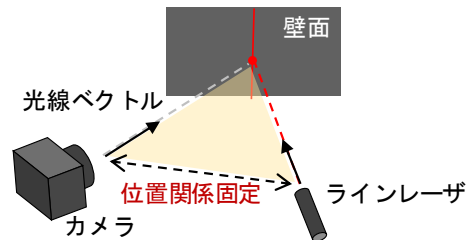


図1 光切断法の原理

る。そして、高精度な 3 次元点群を取得することを目的とする。

2 提案手法

提案手法の概略図を図 2 に示す。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)、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、背景の輝度を除去するために、リングレーザを点滅させながら光切断法による 3 次元計測を行う。そして、断面計測装置を移動させながら計測を行うことで、1 断面分の 3 次元形状を多断面分計測する。加えて、断面計測装置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を撮像することで 3 次元形状が既知のレーザ照射光を利用し、カメラの位置姿勢変化を推定する。これにより、壁面にテクスチャが存在しない場合も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が観測カメラから確認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 3 次元座標の算出

まず、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レーザの光線ベクト

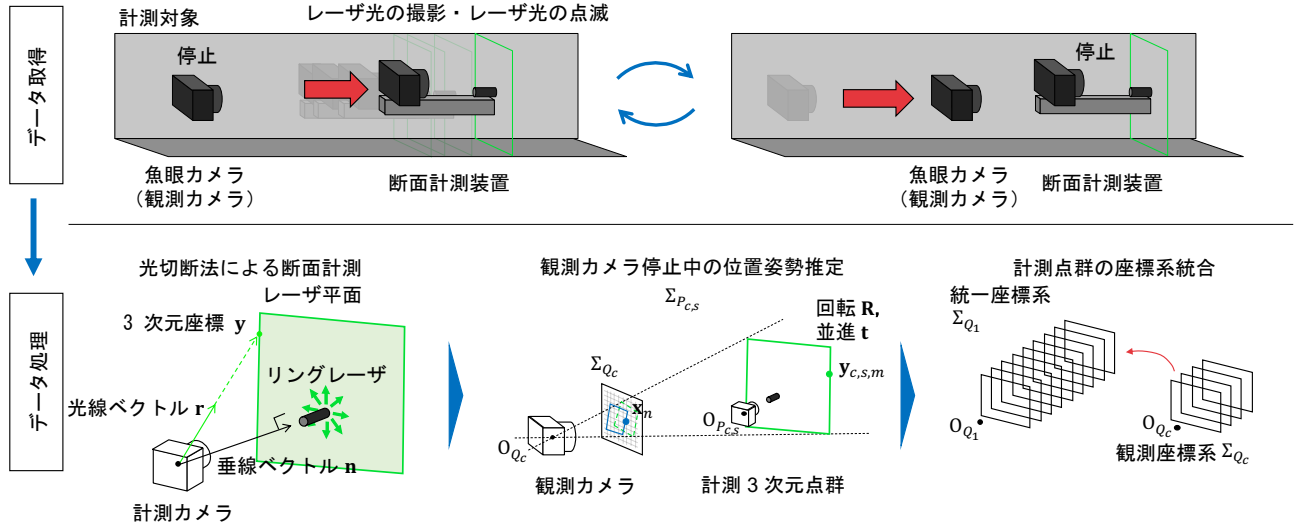


図2 提案手法の概略図

ルを算出する。撮影画像に対する前処理として、レーザ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、背景がわずかに変化することで、環境中の照明が差分画像に現れる。そこで、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。続いて、レーザの画像座標を算出するために画像中心を回転中心として一定角度だけ画像を回転させる。回転された画像上で、閾値を超える輝度のピクセルについて画像中心から画像の右方向に沿って輝度重み付き重心にレーザの画像座標を決定する。画像回転における解像度の補完はバイリニア補完により行う。

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壁面全体に照射されるレーザを撮影可能にする。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 [7] 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、次式でレーザが照射されている3次元座標 $\mathbf{y}$ を求める。

$$\mathbf{y} = s_{\ell} \mathbf{r}, \quad (1)$$

$$\mathbf{n}^T (\mathbf{y} - \mathbf{n}) = 0, \quad (2)$$

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ルする実数、 $\mathbf{n}$ はレーザ平面に対する垂線ベクトルである。

2.1.2 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への垂線ベクトル $\mathbf{n}$ が既知である必要がある。魚眼カメラモデルの内部パラメータ推定

は、幾何情報が既知のチェッカーボードを用いて行う。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。

レーザ平面への垂線ベクトル $\mathbf{n}$ 導出の概略図を図3に示す。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を複数箇所で撮影する。このとき事前に同定したカメラ内部パラメータを用いることで、それぞれの位置におけるチェッカーボードの3次元座標を求めることができる。カメラ座標系からチェッカーボード座標系への座標変換を回転行列 $\mathbf{R}$ 、並進ベクトル $\mathbf{t}$ で表すと、チェッカーボードに投影されたレーザ画像座標から導出したレーザ照射光への光線ベクトル $\mathbf{r}$ について次式の関係が成立する。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T (s_b \mathbf{R} \mathbf{r} + \mathbf{t}) = 0. \quad (3)$$

この式を s_b について解くことで、式 (1) からチェッカーボード上のレーザの3次元座標を求めることができる。求めた3次元点群から $\mathbf{n}$ を最小二乗法により推定する。

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4に示す。観測カメラを環境中に固定したうえで光切断装置を移動させ、一定数の断面を計測のち停止させるという動作を1サイクルとし、サイクル c での計測断面数を S_c とする。このとき、サイクル c ではカメラ同士の位置姿勢が S_c 個算出される。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

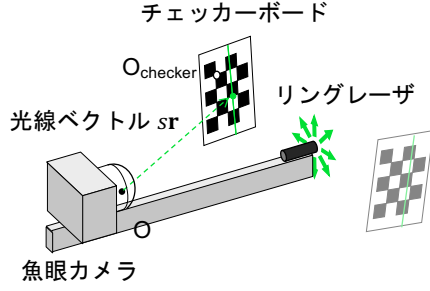


図3 レーザ平面のキャリブレーション

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して行う。

サイクル c 、 s 断面目における m 番目の計測点 $y_{c,s,m}$ を統一座標系 Σ_{Q_1} で表すためには次式で変換される。

$$Q_1 y_{c,s,m} = Q_1 T_{Q_2} \dots Q_{c-1} T_{Q_c} Q_c T_{P_{c,s}} P_{c,s} y_{c,s,m}, \quad (4)$$

ここで、 ${}^B T_A$ 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。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 断面目の計測における座標系とサイクル $c-1$ 、 S_{c-1} の計測における座標系を一致させる。したがって、次式の同次変換が成立する。

$$Q_{c-1} T_{Q_c} = Q_{c-1} T_{P_{c-1,S_c}} P_{c,1} T_{Q_c}. \quad (5)$$

式 (5) を式 (4) に代入することで、 $Q_c T_{P_{c,s}}$ ($c = 1, 2, \dots, C, s = 1, 2, \dots, S_c$) 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 $Q_c T_{P_{c,s}}$ 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 $Q_c T_{P_{c,s}}$ を推定する。また、両点群の対応無し 2D-3D マッチングを Rigid Coherent Point Drift [8] を拡張したアルゴリズムにより行う。

観測カメラから 2.1.1 項と同様の手法でレーザ座標抽出を行った 2 次元点群を $\mathcal{X} = \{x_n \in \mathbb{R}^2, n = 1, 2, \dots, N\}$ とし、断面計測装置で計測された 3 次元点群を $\mathcal{Y} = \{y_m \in \mathbb{R}^3, m = 1, 2, \dots, M\}$ とする。観測カメラ画像から抽出したレーザが取得される確率が、計測 3 次元点群を観測カメラ平面に投影した座標をセン

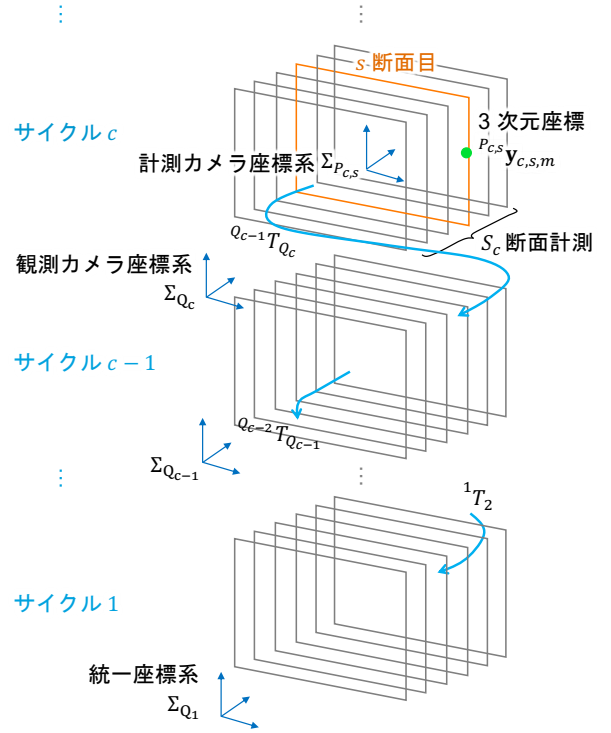


図4 計測断面の座標系統合

トロイドとした混合ガウス分布に従うと仮定する。そして、画像座標を標本として算出した尤度を最大化することで $\mathcal{Y}$ に対して適用する回転行列、並進ベクトルを最適化する。

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される。

$$p(\mathbf{x}) = w \frac{1}{N} + (1 - w) \sum_{m=1}^M \frac{1}{M} p(\mathbf{x}|m), \quad (6)$$

ここで、 $p(\mathbf{x}|m)$ は混合ガウス分布における m 番目のコンポーネントであるガウス分布を意味する。そして、次式の負の対数尤度 $E(\theta, \sigma^2)$ を回転行列 $\mathbf{R}$ 、並進ベクトル $\mathbf{t}$ について最小化する。

$$E(\theta, \sigma^2) = - \sum_{n=1}^N \log \sum_{m=1}^{M+1} P(m) p(\mathbf{x}|m), \quad (7)$$

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、負の対数尤度の最小化を 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。

3 次元座標を 2 次元平面に投影する射影変換を $\mathcal{T}(y_m, \theta)$ とすると、射影変換は実数 s_h を用いて次の



図5 3次元計測装置

ように表される.

$$s_h \begin{bmatrix} \mathcal{T}(\mathbf{y}_m, \boldsymbol{\theta}) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}\mathbf{y}_m + \mathbf{t}. \quad (8)$$

Eステップでは2次元点群 $\mathcal{X}$ がそれぞれのガウス分布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)は次式で表現される.

$$Q(\boldsymbol{\theta}, \sigma^2) = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M P^{\text{old}}(m|\mathbf{x}_n) \|\mathbf{x}_n - \mathcal{T}(\mathbf{y}_m, \boldsymbol{\theta})\|^2 + \frac{N_{\mathbf{P}} D}{2} \log \sigma^2, \quad (9)$$

ここで, $\mathbf{R}$ 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. 以上で求めた $\mathbf{R}, \mathbf{t}$ を同次変換行列として表すことで $Q_c \mathbf{T}_{P_{c,s}}$ が算出される.

3 実験

3.1 方法

実験に用いた3次元計測装置を図5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59.94fps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リリースにより一致させた. 断面計測装置におけるリングレーザと魚眼カメラの距離は約1m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. レーザの

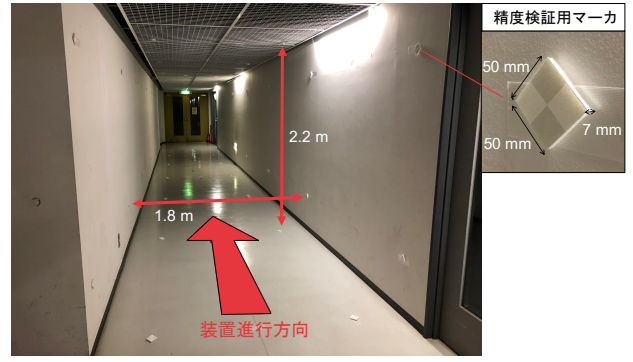


図6 計測対象

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1000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. 計測対象は図6に示す幅約2m, 高さ約2mの通路であり, 装置を奥に向かって10mにわたり手動で移動させた. 精度検証のために2m間隔で6断面分, 1断面あたり8箇所マーカを設置し, 真値として廊下の高さと幅が一定であると仮定し, マーカの3次元座標をレーザ測距計により計測した. 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, 2mおきに計6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. 真値と計測点群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, 10m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. そのとき, 観測カメラの移動は約2.5, 5.0, 7.5mの地点で行った. また, 真値と計測点群の座標系は全48マーカ点について最小二乗法により一致させた.

さらに, 断面統合における累積誤差の評価として, 観測カメラを10mの計測中一度も移動させなかった場合と, 約2.5, 5.0, 7.5m地点で断面計測装置付近に移動させた場合の点群を比較した.

3.2 結果と考察

3.2.1 光切断法による断面計測精度検証

1断面分のレーザ画像を図7に示す. 差分画像をとることで, 背景の影響を抑えたレーザ抽出ができていることがわかる. また, 1断面分光切断法により計測した結果を図8に示す. 点群は計測対象の断面の概形を正しく

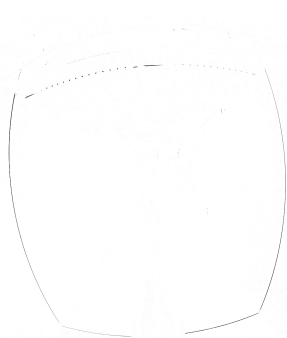


図7 白黒反転した断面計測装置で撮影されたレーザ差分画像

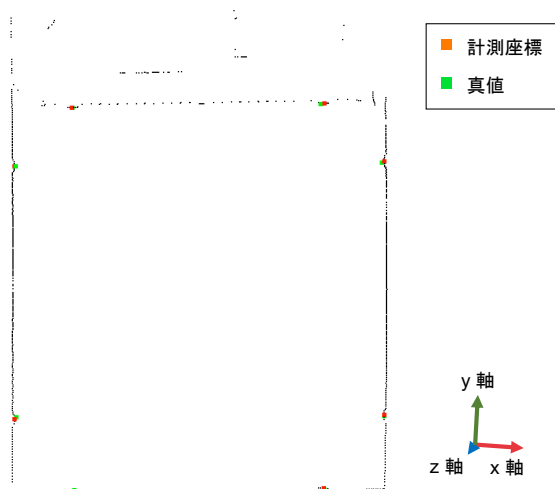


図8 光切断法による1断面計測結果

復元できており、差分画像で含まれていた歪みが魚眼カメラモデルによりほぼ除去されたことが確認できる。

計測精度の定量的評価として、各断面ごとにマーカとの座標系合わせを行ったときの軸ごとの計測誤差を図9に示す。図9を見ると、 x 軸、 y 軸方向それぞれに偏った誤差は見られなかったことがわかる。また、3次元点から抽出したマーカ座標と真値のユークリッド距離は6断面で平均12.30 mm、分散4.87 mmであった。図8ではほとんどの歪みが除去されているものの、点群に魚眼歪みがわずかに生じている。したがって、計測誤差の原因として、カメラ内部パラメータとレーザ平面への垂線ベクトル $\mathbf{n}$ のキャリブレーションが十分に行えていなかったことが考えられる。

3.2.2 断面統合された3次元計測精度検証

断面統合された3次元点群を図10に示す。計測された点群は1020断面分約79万点であった。また、実行環境CPU Intel Core i7-8700K (3.70 GHz, 6コア)、メモリ32 GB、OS Ubuntuのもとで、3次元点群生成にか

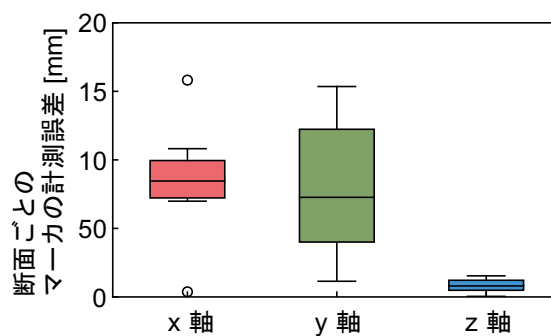


図9 各断面計測の各軸方向のマーカ計測誤差

かった時間は光切断法による断面計測と計測断面の統合を合計して約60分であった。点群の概形から、1回目に観測カメラを移動させた区間において断面統合誤差が発生したが、それ以外の部分では適切に統合されたことが確認できる。また、点群密度の不均一な箇所も正しく断面が統合されていることから装置の移動速度に依存せず正確に統合された。大きな断面統合誤差は観測カメラを移動させた区間付近で発生しており、座標変換行列の推定精度が低かったことが原因と考えられる。断面計測装置を移動させていくにつれ、観測カメラ上では照射されているレーザ光の画像上でのサイズが小さくなる。その結果、十分な精度で観測カメラ上のレーザ画像座標を算出できなくなることで真値からわずかに外れた位置姿勢に収束し、断面統合に誤差を含んだ可能性がある。したがって、提案手法では観測カメラからのレーザ光の画像座標算出をより正確に行う必要がある。

次に、3次元形状の各軸方向の真値とのずれを評価するため、設置したマーカにおける誤差を評価した。計測3次元点群から抽出したマーカの計測座標とレーザ測距計で計測した真値を図11に示す。また、図11の誤差を定量的に評価するために、各軸方向のマーカ計測誤差を真値との差の絶対値を軸ごとに算出した(図12)。図12では、 y 軸方向の誤差が x 軸、 z 軸方向の誤差よりも小さくなる傾向が確認できる。ここで、 x 軸方向は計測装置が回転可能な向き、 y 軸方向は計測装置がほぼ回転不可能な向きである。そのため、今回の計測では y 軸方向の移動を行わなかったため、 y 軸方向には誤差が生じにくかった可能性がある。したがって、より正確な点群を生成するためには計測装置の回転に対する推定精度を向上させることが必要となる。また、計48点の計測座標と真値のユークリッド距離は平均74.66 mm、分散34.12 mm発生した。

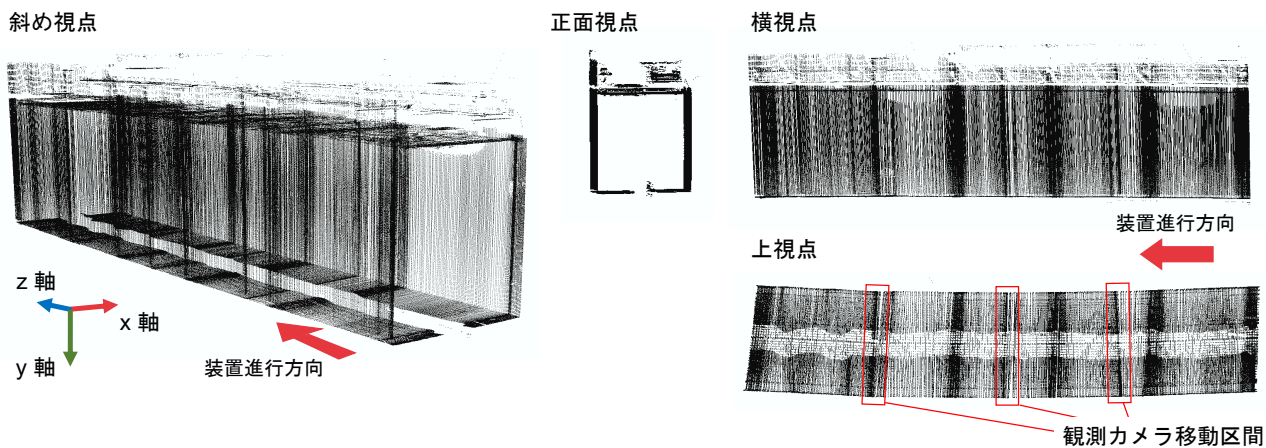


図 10 提案手法により計測された 3 次元点群

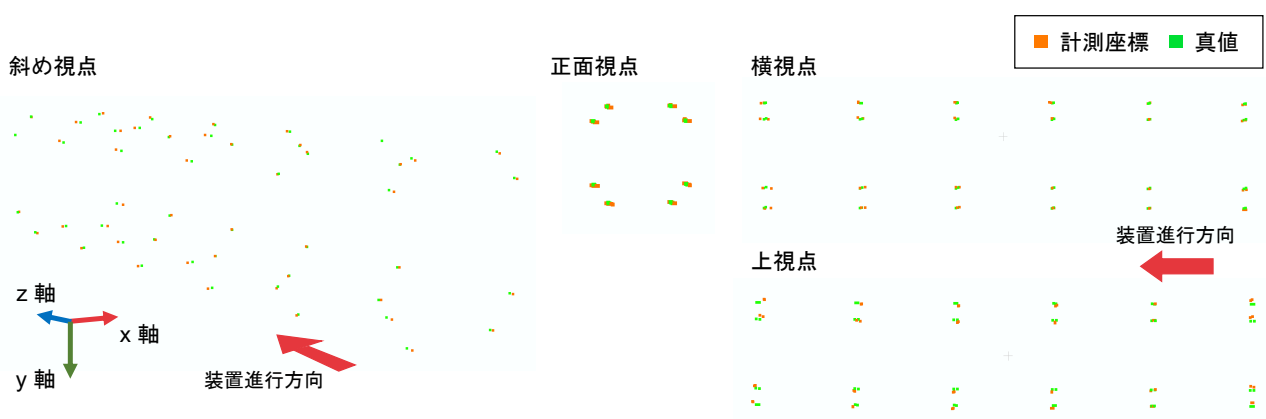


図 11 3 次元点群から抽出したマーカ座標とレーザ測距計で計測した真値

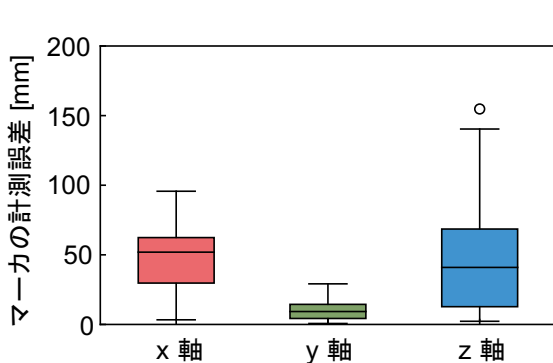


図 12 断面統合点群の各軸方向のマーカ計測誤差

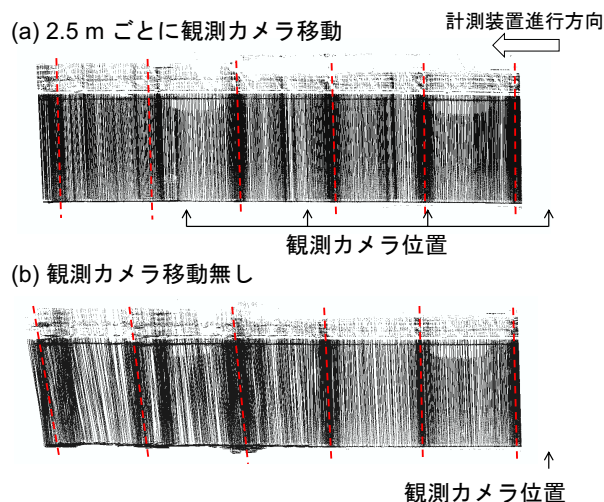


図 13 観測カメラ移動の有無による点群の側面比較

3.2.3 累積誤差の検証

10m 観測カメラを更新しなかった場合と、2.5m おきに更新した場合の横から見た計測 3 次元点群を図 13 に示す。断面計測装置は y 軸方向（首振り方向）の移動を行っていないため、真値では常に一定の傾きとなる。図 13 (a) の観測カメラを更新した場合は計測区間全体で y 軸方向の傾きがほぼ一定であり、計測断面の回転を正

確に推定できていることが確認できる。一方、図 13 (b) の観測カメラを 1 度も更新しなかった場合は後半に近づくにつれ、統合された点群が徐々に傾いている。したがっ

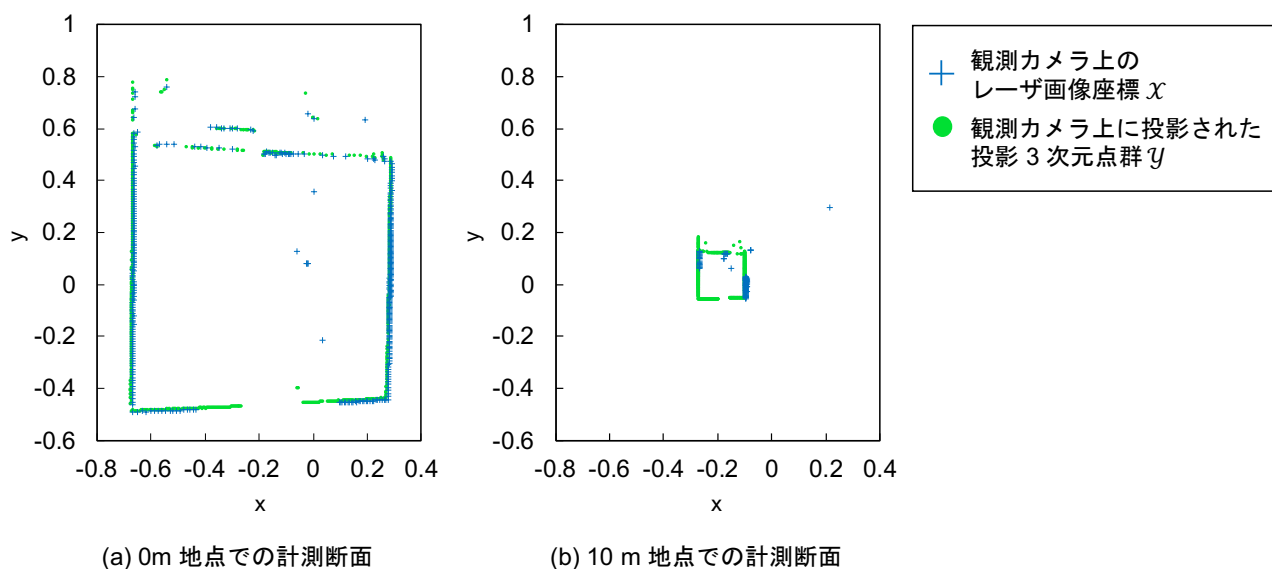


図 14 観測カメラ位置の移動を 1 度も行わなかった場合の 2D-3D マッチング結果

て、観測カメラを一定距離ごとに移動すると、計測断面の角度推定精度が向上すると考えられる。

角度推定精度の低下の原因を評価するために、観測カメラの移動を 1 度も行わなかった場合について、0 m 地点の計測断面と 10 m 地点におけるそれぞれの 2D-3D マッチング結果を図 14 に示す。ここで、図 14 におけるプロット座標は、観測カメラ内部パラメータを用いピクセル座標から算出した、観測カメラ座標系で $z = 1$ の観測カメラ平面に投影された光線ベクトルである。0 m、10 m 両地点での計測点数は観測カメラ平面に投影した断面 3 次元点群 y の方が多く、観測カメラから直接算出した光線ベクトル x には誤検出と欠損が発生した。また、10 m 地点では特に x の欠損が多かった。この原因として、10 m 遠方に照射されているレーザ光をカメラで撮影した際、レーザ光が減衰することで画像座標として抽出することが困難であったことが考えられる。その結果、偏った画像座標の算出誤差を含む少数の点のみから位置姿勢推定が行われることで、断面計測装置と観測カメラの距離が大きいときの断面統合における角度推定精度が低下したと考えられる。

4 結論

本論文では、2 台の魚眼カメラとリングレーザを用いた光切断法において照射されるレーザについて 2D-3D マッチングを行うことで複数の計測断面間の位置姿勢推定を行い、推定した回転行列と並進ベクトルから計測断面の座標系を統合することで高精度な 3 次元点群を取得する手法を提案した。実験では、壁面に特徴的な塗装や形状の無い廊下に対し 3 次元計測を行った。その結

果、真値との誤差が平均 74.66 mm、分散 34.12 mm の 3 次元計測を実現した。また、断面計測装置の位置姿勢を観測するカメラを移動させて断面統合を行う際、撮影画像からの抽出レーザ点の少なさに起因する誤差が発生した。

今後の課題は、より正確な断面統合のためのレーザ抽出とキャリブレーション精度向上、トンネルのようにオクルージョンが多く発生する可能性がある環境での 3 次元計測である。

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

- [1] R. Van Gosliga, R. Lindenberg, and N. Pfeifer, “Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning,” *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, vol. XXXVI, no. 5, Dresden, pp. 167–172, Sept. 2006.
- [2] 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 XXIIst ISPRS Congress*, vol. XXXVII, no. B5, Beijing, pp. 573–581, July 2008.
- [3] V. Gikas, “Three-dimensional laser scanning for geometry documentation and construction man-

agement of highway tunnels during excavation,” *Sensors*, vol. 12, no. 8, pp. 11249–11270, 2012.

- [4] 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*, vol. 14, no. 4, pp. 307–323, 1996.
- [5] 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*, vol. 31, no. 2, pp. 251–262, April 2019.
- [6] 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*, vol. 91, p. 102995, 2019.
- [7] 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*, Rome, pp. 3945–3950, April 2007.
- [8] A. Myronenko and X. Song, “Point set registration: Coherent point drift,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 32, no. 12, pp. 2262–2275, 2010.