

三脚・UAV・4脚ロボット搭載型計測装置による 光切断法に基づくトンネル3次元計測の比較

○伊賀上 卓也^{*1}, 速水 桃子^{*1}, 吉田 健一^{*2}, 山中 哲志^{*2},
浅間 一^{*1}, 山下 淳^{*1}

Comparison of Tunnel Three-Dimensional Measurement Based on Line-Structured Light Method Using Tripod, UAV and Quadruped Robot

Takuya Igaue^{*1}, Toko Hayamizu^{*1}, Kenichi Yoshida^{*2}, Satoshi Yamanaka^{*2},
Hajime Asama^{*1}, Atsushi Yamashita^{*1}

^{*1} 東京大学大学院, 工学系研究科

The University of Tokyo, Graduate School of Engineering

^{*2} 大林組, 生産技術本部

Obayashi Corporation, Civil Engineering Technology Division

本稿では, トンネル出来形評価を目的とし, 光切断法に基づき断面の3次元計測を行う移動ロボットの比較検証を行った. ワンショットで断面形状の3次元計測が可能な光切断法を, 三脚・UAV・4脚ロボットへと搭載した. 3種全ての構成で, 断面形状を細部まで確認可能な3次元点群を計測可能であった. 中でも4脚ロボットは計測精度が 26.7 ± 14.3 mmと高精度である上, リモートコントローラによる簡便な計測が可能であり最も有効であった.

Key Words: 道路トンネル, 光切断法, UAV, 脚ロボット

1. はじめに

トンネルの施工品質管理や安全性評価を目的とし, トンネル出来形の評価が行われている. 施工段階におけるトンネル出来形評価では, 基準が国土交通省により定められており⁽¹⁾, この基準に基づきトンネル断面の形状評価が行われる. そして, トンネルの幅や高さ, コンクリート厚が規格値内で管理されているかどうかを調査する. 評価項目の内, トンネルの幅や高さの計測において最も実施されている評価手法は, 目盛テープを用いた長さ計測である. 近年では, 計測作業をより短時間に少人数で行い施工効率を向上させるために, 3次元計測機器を用いた出来形計測も行われている.

3次元計測技術による出来形計測で用いられるのが, 建設工事全般で一般的な計測機器であるトータルステーションである⁽²⁾. トータルステーションでは, 光の往復時間を利用した Time of Flight 方式に基づき3次元計測を行う. また, 計測者が測点を視準することで, 測点の座標計測が可能である. トータルステーションを用いた計測では, 1箇所ごとの計測に多くの時間を要するため, トンネル断面の限定された数点のみを計

測可能である. その一方, トンネル断面の断面形状計測においては, 特殊車両等の背の高い車両の通行性能や, ジョットファン設置後の通行性能を確認する. そのため, 建設された道路トンネルが正常に通行可能な大きさであるかどうかを, 最も接触の可能性の高い箇所を含めた, トンネル全体の3次元点群で評価することが必要とされている. したがって, トンネル断面の3次元計測を, より密に行うことが可能な3次元計測技術の開発が望まれている.

トータルステーションより密な3次元計測機器として, レーザスキャナの使用が提案されている⁽³⁾. レーザスキャナは Time of Flight 方式の点計測を1つの地点から全方向へ回転させながら断面状の3次元座標を取得する. レーザスキャナでは, 全方位の点計測が自動化されることで多点の計測が高速化されている. とところが, 計測された点群のうち, 計測箇所と照射されるレーザ光のなす角度が小さくなる箇所では, 光が照射される面積が大きくなり計測精度が低下する. また, 点計測を走査するため, 遠方では計測密度が疎になる. 以上の理由から, レーザスキャナでは, 使用不可能な

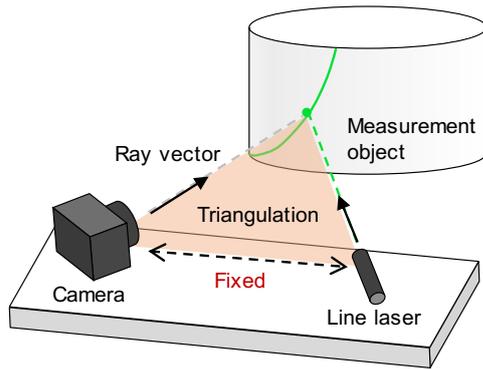


Fig. 1 Three-dimensional measurement based on line structured light method.

計測点が多く存在する。ところが、計測結果としてすべての計測点群が単一の点群データとして出力されるため、不要な点群の計測時間だけ余分に計測時間を消費するという欠点がある。加えて、レーザスキャナを用いた断面評価では、取得点群から断面形状を算出する処理が必要となるため、断面データ抽出の時間が別途必要となる。

レーザスキャナでは現状計測データの処理時間を多く要する一方で、断面の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^(4,5,6,7)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 (Fig. 1)。光切断法ではワンショットで線状のレーザが照射されている個所を計測する手法であり、密な3次元計測を高速に行うことが可能である。光切断法の中でも、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断面分の点群が算出される^(6,7)。トンネルにおいては、断面形状が車両の通行性能として評価に用いられるため、断面として計測データが取得されることは、点群データから断面を抽出する処理が不要であり有用である。

以上の光切断法に基づく断面計測をトンネル施工現場で実施するためには、施工を妨害しないために、不整地においても走行可能な装置構成を行うことが重要である。Zhanら⁽⁴⁾やFarahaniら⁽⁶⁾は鉄道トンネルでの使用を目的としレール上を移動する計測装置を構成した。この手法では、光切断法によりトンネル断面を計測可能であるが、計測装置がレール上のみを走行可能であるため、レールの存在しない場合が多い施工中のトンネルには適用できない。また、Higuchiら⁽⁶⁾は屋内廊下において光切断法で計測するシステムを構築した。この計測装置はレール上以外においても走行可能な車

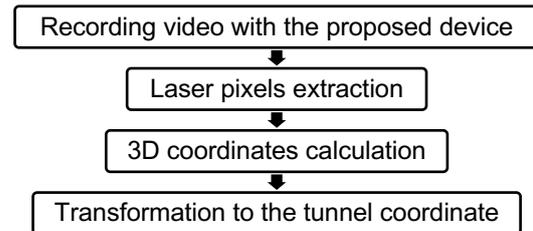


Fig. 2 Measurement flow of the proposed method.

輪を搭載した計測装置である。ところが、小型の車輪を用いた計測装置であり、地下水によって泥濘化された路盤や、コンクリート舗装がなされていない不整地では車両の滑りで移動が困難である。一方で、移動ロボットの中でも、飛行することで地上の影響を受けにくいUAV (Unmanned Aerial Vehicle) や、車輪を用いない4脚ロボットは不整地においても走行性能が高い。したがって、UAVや脚ロボットへと光切断法に基づく計測装置を搭載することができれば有用である可能性がある。

以上から、本稿では、不整地であるトンネル施工現場においても計測可能な断面計測装置を、UAVや4脚ロボットを用いて新規に構築することを目的とする。その際、光切断法に基づく密な3次元計測を行うことで、トンネル断面全体の形状から通行性能を確認可能な3次元点群を取得する。

2. 提案手法

提案手法による計測手順及びデータ処理手順を Fig. 2 に示す。初めに、光切断法による計測装置をトンネル内へ設置し動画を撮影することで、3次元計測に必要なデータの取得を行う。続いて、取得した動画のフレームからレーザ光のピクセル座標を算出する。その後、算出したピクセル座標から、魚眼カメラモデルを利用した3角測量に基づく3次元計測を行う。以上により、カメラ座標系におけるトンネル断面の3次元点群を算出する。最後に、事前に設置しておいた座標が既知のARマーカを利用し、計測断面をトンネル座標系における点群へ変換する。これにより、トンネル内における点群の位置を特定し、トンネル出来形計測結果として活用可能とする。

2.1 光切断法に基づく断面計測

カメラ画像からレーザの画像座標を算出する手法の概略図を Fig. 3 に示す。本研究では、360度方向へレーザ照射するレーザをリングレーザと称する。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。その際、

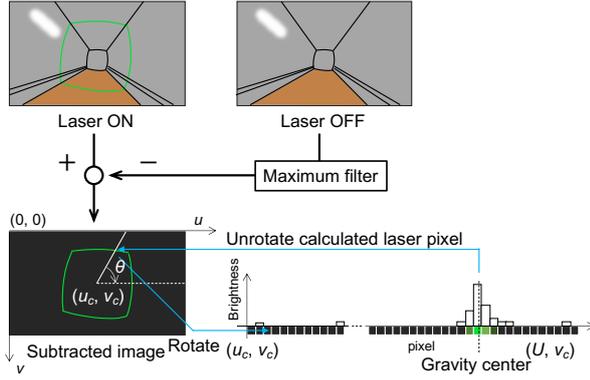


Fig. 3 Laser pixel extraction

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。差分画像としては、レーザが照射されている時刻 t の画像 $\mathbf{I}(t)$ と、その直前のレーザが照射されていない時刻 $t-1$ の画像 $\mathbf{I}(t-1)$ を利用する。そして、次式により、背景の影響が差分画像中に現れることを抑制した差分画像 $\mathbf{I}_d(t)$ を算出する。

$$\mathbf{I}_d(t) = \mathbf{I}(t) - \mathbf{I}(t-1). \quad (1)$$

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。レーザ平面とおおよそ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。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'_θ, v'_θ) を決定する。

$$(u'_\theta, v'_\theta) = \left(\sum_{u=u_c}^U \frac{\alpha_u}{\sum_{u'=u_c}^U \alpha_{u'}} u, v_c \right), \quad (2)$$

$$\alpha_{u'} = \begin{cases} 0 & \text{if } \mathbf{I}_d(u', v_c) < T \\ \mathbf{I}_d(u', v_c) & \text{if } \mathbf{I}_d(u', v_c) \geq T \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{I}_d(u, v)$ は差分画像中の座標 (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

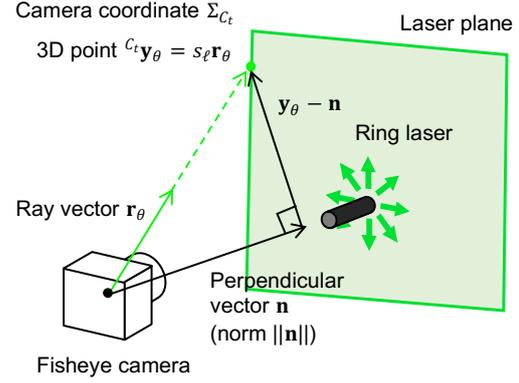


Fig. 4 Line structured light-based three-dimensional coordinate calculation with ring laser.

おけるピクセル間の補間はバイリニア補間により行う。

続いて、魚眼カメラモデルにより、光線ベクトルを求める。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が撮影可能である。魚眼カメラでは、歪みを含むため、初めにこの歪みを除去する。歪み除去に Mei らのカメラモデル⁽⁸⁾を用いる。

最後に、リングレーザが平面を形成することを利用した 3 次元計測を行う。リングレーザによる光切断法の原理を Fig. 4 に示す。リングレーザ光を照射すると、平面状の構造光を形成する。光切断法では、この平面性を利用して三角測量を行う。事前に導出したカメラ内部パラメータ $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を用い、次式から角度 θ における光線ベクトル $\mathbf{r}_\theta \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ を導出する。

$$s_c \begin{bmatrix} u_\theta \\ v_\theta \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \mathbf{r}_\theta, \quad (4)$$

ここで、 $s_c \in \mathbb{R}$ はピクセル座標のスケーリングパラメータである。このとき、 \mathbf{r}_θ と、時刻 t のカメラ座標系における 3 次元座標 ${}^{C_t} \mathbf{y}_\theta$ は、リングレーザへの垂線 $\mathbf{n} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ について、次式を解くことで角度 θ における 3 次元座標を算出する。

$${}^{C_t} \mathbf{y}_\theta = s_\ell \mathbf{r}_\theta, \quad (5)$$

$$\mathbf{n}^T ({}^{C_t} \mathbf{y}_\theta - \mathbf{n}) = 0, \quad (6)$$

ここで、 s_ℓ は、光線ベクトルのスケーリングを行うパラメータである。

以上の光切断法に基づく断面計測を各角度に対し行い、最終的に、トンネル断面の 3 次元点群 ${}^C \mathbf{Y}(t) = \{{}^C \mathbf{y}_1, {}^C \mathbf{y}_2, \dots, {}^C \mathbf{y}_M\}$ を取得する。

2.2 AR マーカを用いたトンネル座標系への変換

提案手法における光切断法では、時刻 t における計測データを時刻 t におけるカメラ座標系 Σ_{C_t}

の3次元点群 ${}^c_t\mathbf{Y}(t)$ として算出する. したがって, 計測データからはトンネル内の計測箇所を特定することができず, 計測点群から出来形評価を行なった場合も, その出来形がどの断面の結果であるかを判別することができない. そのため, 提案手法では, トンネル内に設置された AR マーカを利用し, 計測された3次元断面点群のトンネル座標 Σ_T における位置を自動的に算出する.

トンネル座標系への変換では, 事前に原点の3次元座標の計測を行った AR マーカ座標を利用する. トンネルで光切断法に基づく計測装置で動画撮影を行うとき, 各時刻の魚眼カメラ画像内には, 複数の AR マーカが撮像される. 初めに, 時刻 t の画像 $\mathbf{I}(t)$ から, AR マーカを検出し, 各 AR マーカの原点のピクセル座標 $(u_i, v_i)(i = 1, 2, \dots)$ を取得する. ここで, AR マーカ座標は, その原点のピクセル座標が取得されるだけでなく, AR マーカの ID を利用することで, ピクセル座標がトンネル内のどの3次元座標と対応しているかを算出可能である. この特性を利用し, ピクセル座標と同時に, 対応するトンネル座標系における AR マーカの3次元座標 ${}^T\mathbf{Y}_i = \{{}^T\mathbf{y}_1, {}^T\mathbf{y}_2, \dots, {}^T\mathbf{y}_i\}$ を取得する. 以上から, (u_i, v_i) 及び ${}^T\mathbf{Y}_i$ に関して, 画像平面上における投影誤差を最小化する Perspective-n-Point 問題を解くことにより, トンネル座標系への変換行列 ${}^T\mathbf{T}_{C_t} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ を算出する. その後, カメラ座標系における計測点群 ${}^c_t\mathbf{Y}$ に対し次式を適用することで, 計測断面をトンネル座標系へと統合する.

$$\begin{bmatrix} {}^T\mathbf{y}_m \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} = {}^T\mathbf{T}_{C_t} \begin{bmatrix} {}^c_t\mathbf{y}_m \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (m = 1, 2, \dots). \quad (7)$$

2.3 光切断法に対する色情報の付加

提案手法における, 点群の色取得方法の概略図を Fig. 5 に示す. 計測された3次元点群の各点における色情報は, トンネルの施工状況を確認する上で重要な指標である. その一方, 提案システムでは, 計測装置が計測している箇所を人から目視可能とするために, 可視のレーザー光を用いる. この場合, レーザが照射されているため, レーザが照射されている画像から壁面の色情報を取得することはできない. そのため, 提案手法では, 可視光レーザーを用いた光切断法において, レーザが照射されていないときの取得画像を利用する. ただし, ロボットは移動し続けながら計測を行うため, レーザが照射された画像座標における色と照射されていない画像座標における色は対応しない. そのため, ロボットの移動量を考慮した上でレーザーが照射されていない画像の色を取得する.

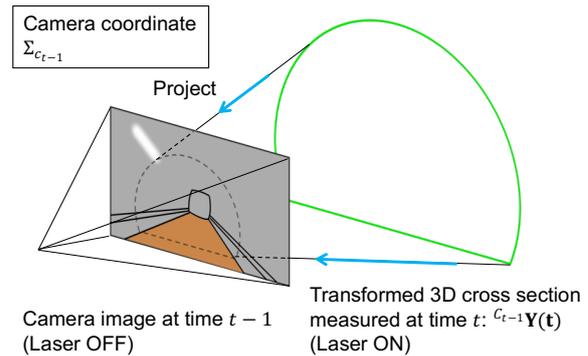


Fig. 5 Color extraction procedure of the cross section.

時刻 t に計測される断面に対する色情報の取得には, レーザが照射されていない画像の中で最も計測に近い時刻に撮影した時刻 $t-1$ の画像である $\mathbf{I}(t-1)$ を利用する. まず, リングレーザーを用いてレーザー光を照射することで, カメラ座標系における光切断法を行う. そして, AR マーカを用いて断面点群をトンネル座標系へ変換することで, 時刻 t において断面の3次元点群 ${}^T\mathbf{Y}(t)$ を取得する. 続いて, レーザが照射されていない画像 $\mathbf{I}(t-1)$ から色情報を取得するために, 時刻 t のカメラ座標 Σ_{C_t} における計測点群を, 時刻 $t-1$ のカメラ座標系 $\Sigma_{C_{t-1}}$ へと変換する. そのために, 環境中に設置した AR マーカを利用し, トンネル座標系 Σ_T から時刻 $t-1$ のカメラ座標 $\Sigma_{C_{t-1}}$ 画像へ変化する行列 ${}^T\mathbf{T}_{C_{t-1}}$ を算出する. このとき, 時刻 t において計測した3次元点群 ${}^T\mathbf{Y}(t)$ は, 次式で時刻 $t-1$ におけるカメラ座標系 $\Sigma_{C_{t-1}}$ へ変換することが可能である.

$$\begin{bmatrix} {}^{c_{t-1}}\mathbf{y}_m \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} = {}^{c_{t-1}}\mathbf{T}_T \begin{bmatrix} {}^T\mathbf{y}_m \\ \mathbf{1} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

その後, カメラ画像へと魚眼カメラモデルを用い, 3次元断面点群を, 時刻 $t-1$ におけるピクセル座標へと投影する. このときのピクセル座標が, レーザが照射されていないときの色である. したがって, ピクセル座標に格納されている色を3次元断面点群の色情報として取得する.

3. 実験

3.1 方法

凹凸がある路盤や泥濘化された路盤においても断面の3次元計測を可能とするため, 光切断法に基づく計測装置を, 三脚, UAV (Unmanned Aerial Vehicle), 4脚ロボットへ搭載した次の3つの計測装置を実装した. 実験に用いた計測装置を Fig. 6 に示す.

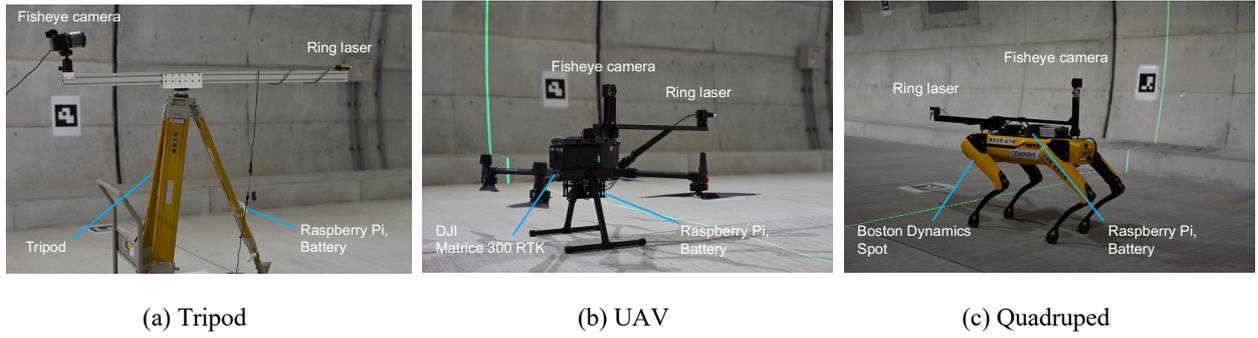


Fig. 6 Measurement devices.

Table 1 Parameters of the proposed measurement device in the camera coordinate.

	Tripod	UAV	Quadruped
レーザー平面への垂線 \mathbf{n} [mm]	[12.5, -29.0, 1225.9]	[-7.6, -10.9, 464.2]	[-11.5, 226.3, 1370.7]
カメラ-レーザー平面間距離 $\ \mathbf{n}\ $ [mm]	1226.3	464.4	1389.3

- (a) 三脚搭載型
魚眼カメラ : Nikon Z7II+AF-S Fisheye NIKKOR 8-15mm f/3.5-4.5E ED (解像度 : 3840x2160 pixels)
- (b) UAV 搭載型
UAV : Matrice 300 RTK
魚眼カメラ : PIXPRO SP360 4K (解像度 : 2880x2880 pixels)
- (c) 4脚ロボット搭載型
4脚ロボット : Spot
魚眼カメラ : PIXPRO SP360 4K

三脚搭載型は、計測者がトンネル構内へ計測装置を固定し計測を行うこととした。そのため、UAV搭載型や4脚ロボット搭載型と比べて重量制限が存在せず、重量の比較的大きな一眼レフカメラを搭載することが可能であった。三脚搭載型では固定して断面計測を行う一方、UAV搭載型では、空中を浮遊移動しながら計測可能とすることで、泥濘化した路盤や、コンクリート打設直後及び養生中の場合でも、移動しながら計測を実施可能であった。4脚ロボット搭載型は、飛行することはいできないが、車輪の滑りが発生せず UAV 同様に不整地においても移動能力が高く構成された。

光切断法による3次元計測時に差分画像を取得するために、各装置に、Raspberry Pi 4 model Bを設置した。Raspberry Piによりレーザーのスイッチングを行うことで、レーザーが照射されている画像と照射されていない画像を取得した。ロボットの動作中にスイッチを人が操作することができない UAV 搭載型と4脚ロボット搭載型では、カメラのフレームレートの1/3の速度である10回/sの速度でレーザー ON/OFFの切り替えを行った。

光切断法による計測プログラムでは、断面計測のための角度分割数を1000点に固定した。各計測装置におけるカメラとレーザーの長さは、事前にキャリブレーションを行い、Table 1の値に固定した。キャリブレーションパラメータ \mathbf{n} の大きさである $\|\mathbf{n}\|$ からは、カメラとリングレーザーの位置関係を魚眼カメラ原点からの長さとして確認することが可能である。ここで、UAVにおいては、重量制限を考慮し、三脚や4脚ロボットより短い長さに設定した。

構築した計測装置の精度検証を行うために、幅約10mの施工中の道路トンネルに対して計測を行った。トンネル壁面はコンクリートにより覆工されており、路盤は土の状態であった。トンネル内にARマーカを1断面分6か所に設置し、精度評価、およびトンネル座標系への変換に利用した。ARマーカの座標計測には、トータルステーションを用いた。ARマーカの生成および検出には、ArUco^(9,10)を利用した。

3.2 結果と考察

3.2.1 断面型即結果の評価

三脚、4脚ロボット、UAVにより計測した原画像をFig.7に、計測した断面点群をFig.8に示す。各手法において、トンネル内の色情報を取得すると同時に、トンネル断面に照射されたレーザー光を、ほぼ360度わたって撮影することが可能であった。トンネル壁面に照射されたレーザーの形状は、UAV搭載型では角の取れた円形として撮像された。これは、UAV搭載型では計測装置の重量制限を考慮して軽量化を行うために、カメラとレーザーの長さを464.4mmに設定する必要があったためである。この距離が短くなることで、魚眼カメラの歪みが強い

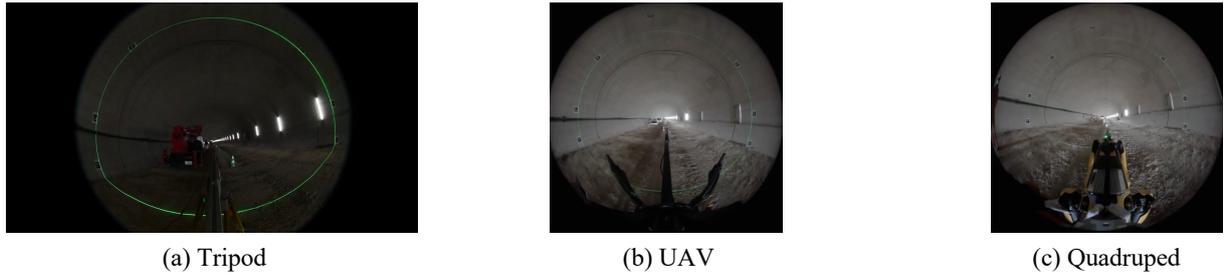


Fig. 7 Original images used for 3D measurement.

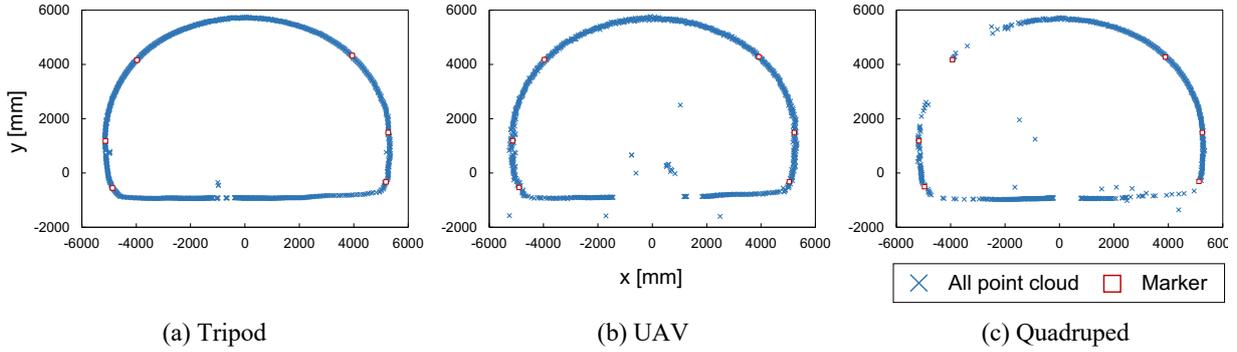


Fig. 8 Measured cross-section point clouds with the proposed measurement devices

外周部の領域へレーザ光が撮像され、断面形状が丸みを帯びた。一方で、カメラとレーザの長さが 1226.3 mm, 1389.3 mm である三脚と 4 脚ロボットのカメラとレーザの長さでは、強い魚眼歪みを含むものの、UAV 搭載型の場合よりもトンネルの形状に近いレーザが撮像された。以上のように計測装置によって異なる程度の歪みが発生していた一方、Fig. 8 ではどの計測装置も歪みが除去された断面形状を 3 次元復元できており、提案手法により、トンネル断面形状を計測可能であることが示された。

また、Fig. 8 では、4 脚ロボットによる計測結果の点群に欠けが大きく存在した。これは、レーザの強度がどのロボットにおいても均一ではなく、特に 4 脚ロボットへ搭載したレーザにおいて強度が低い箇所が存在したためである。その結果、レーザのピクセル座標を撮影画像から十分に抽出できなかったため、計測点群に欠けが生じた。したがって、トンネル内における光切断法では、断面径が大きな場合も光量が減衰しにくい強度のレーザを用いることが必要であることが明らかとなった。本稿で構成した脚ロボットにおいても、三脚や UAV と同様に、より強度の均一なレーザを用いることで、レーザの欠けを防ぐことが可能である。

レーザ光の強度に起因する点群の欠けは生じたものの、レーザの強度が十分な場合は角度ごとに等しい点数 (最大 1000 点/断面) の点群が取得されており、トンネル断面全体の形状を評価可能な、密な点群を計測可能であった。提案手法では画像処理段階で角度分割数

Table 2 Measurement accuracy and rate of the proposed measurement devices

	Tripod	UAV	Quadraped
Measurement rate [s]	10.0	5.0	5.0
Mean [mm]	19.3	44.1	26.7
SD [mm]	9.2	19.5	14.3

を指定するため、計測密度を事前に設定するパラメータとして、さらに大きな値を設定することが可能である。したがって、パイプやロックボルトのような小さな物体も、計測点数を多く設定することで計測できる。

提案手法の連続計測可能頻度、およびトンネル内に設置した 6 点の AR マーカにおける計測精度を Table 2 に示す。一般的なカメラは、ローリングシャッター効果により 1 フレームで画像全ての領域のレーザ光の ON/OFF が切り替わらない。その結果、連続する 2 フレームのみから、レーザ光のみが抽出された差分画像を算出することができない。そのため、今回の実装では 3 フレームを ON/OFF 画像の取得に割り当てた。これにより、カメラフレームレートの 1/6 の速度で断面の計測が可能であった。

トンネルにおける出来形計測の内、基準高・幅・高さの評価では、50 mm の基準値が設定されている¹⁾。Table 2 の計測精度をこの基準値と比較すると、提案手法のうち、三脚搭載型と 4 脚ロボット搭載型は標準偏差を含めて範囲内である。したが

って、Table 2 の定量評価で生じた誤差を考慮した基準値を設定する範囲では、提案手法による出来形評価が可能である。その一方、UAV 搭載型は、計測精度が最も低くなる結果となった。これは、UAV 搭載型ではカメラとレーザの長さが 464.4 mm と他 2 つの計測装置に比べて短く、レーザ光が魚眼カメラ画像の外周部にレーザが圧縮されて撮像されたためである。これにより、カメラ原点から壁面の距離が変化した場合もレーザ光が撮像されるピクセル変化が小さくなり、レーザ光のピクセル座標を十分な精度で算出することが困難となった。

三脚搭載型では、最も計測精度が高かった。ただし、計測には必ず人手による据え付け作業が必要であり、複数の断面を計測することが困難であった。その一方、4 脚ロボットと UAV はリモートコントローラによって計測装置を移動させることができ、計測の簡便性が高かった。

三脚搭載型や UAV 搭載型には、それぞれ計測の簡便性、計測精度において課題が残る一方、脚ロボットでは、その両面が高かった。したがって、今回実装した 3 種のシステムのうち、4 脚ロボット搭載型がトンネルの断面計測に対し最も有用であることが示された。

3.2.2 AR マーカを利用した連続断面計測

計測精度と不整地における走行性が高かった 4 脚ロボット搭載型計測装置を用い、トンネルの断面点群を連続的に計測した結果を Fig. 9 に示す。提案手法では、トンネル座標系における 3 次元座標が既知の AR マーカを自動検出し、計測断面点群をトンネル座標系へと変換することが可能であった。そのため、断面の 3 次元点群算出と同時に、断面点群のトンネル内における位置を取得することが可能となった。したがって、現場で実際に計測を行わなかった者も、トンネル断面点群と位置情報を同時に確認できた。また、提案手法ではレーザが照射されていない画像から色情報を取得した。そのため、トンネル内の 3 次元形状だけでなく、設置した AR マーカや、坑内蛍光灯の座標を取得可能であった。これにより、人がトンネル 3 次元点群から出来形やトンネル内の施工状況を目視で確認可能となった。また、計測は 4 脚ロボットを徒歩と同程度の速度で走行させながら計測を行なった。その一方、提案手法では、カメラのフレームレートの 1/6 の速度で断面計測を連続的に行うことが可能であったため、車両進行方向に対して高密度に断面の計測を達成した。こ

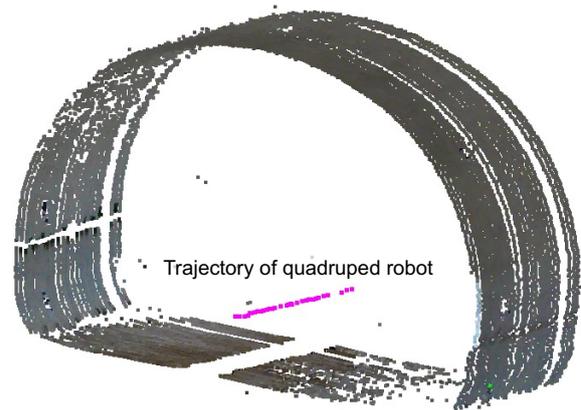


Fig. 9 Measured point cloud with the proposed method

れにより、トンネル内のロックボルトや、構築された監査廊等の小さな物体の形状も計測可能となった。

4. おわりに

本稿では、不整地であるトンネル施工現場においても断面計測が可能な装置を構成した。そして、断面計測を高速かつ密に行うために、光切断法に基づき 3 次元計測を行うシステムを構築した。実験では、最も単純な計測装置である三脚による固定計測に加え、不整地においても走行性能の高い UAV、4 脚ロボットへ計測装置を搭載し、道路トンネル計測を行なった。

光切断法に基づく 3 次元計測では、3 種全ての計測装置でトンネルの形状を高精度に算出可能であった。また、計測断面のトンネル座標系への統合を達成し、3 次元点群のトンネル内における位置を取得可能となった。以上から、トンネル内の特定の箇所が出来形を、密な 3 次元断面点群として取得可能となった。

構成した計測装置のうち、三脚は人が据え付け作業を行う点において、断面の連続した計測が困難であった。また、UAV は重量制限に伴いカメラとレーザの長さを短く設定する必要があるため、計測精度に課題が残った。その一方、4 脚ロボットでは計測をリモートコントローラで行うことができ、かつカメラとレーザの長さも三脚と同程度に設定可能であったため計測精度が高かった。したがって、三脚・UAV・4 脚ロボットによる計測を比較すると、4 脚ロボットがトンネル出来形計測に最も有効であることが明らかとなった。

今後の課題は、4 脚ロボットを用いた断面計測装置の計測精度向上、及び計測結果の点群を用いた出来形評価である。

謝 辞

提案手法の現場試行は、国土交通省「官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM)」予算を活用して実施した。

参 考 文 献

- (1) 国土交通省, “土木工事施工管理基準及び規格値”, 第10編. 2021.
- (2) 国土交通省, “TS (ノンプリズム方式) を用いた出来形管理要領 (土工編) (案) ”. 2017.
- (3) 国土交通省, “レーザースキャナーを用いた出来形管理の試行要領 (案) (トンネル編) ”. 2017.
- (4) Dong Zhan, Long Yu, Jian Xiao and Tanglong Chen, “Multi-camera and structured-light vision system (MSVS) for dynamic high-accuracy 3D measurements of railway tunnels”, *Sensors*, vol. 15, no. 4, pp. 8664–8684. 2015.
- (5) Behzad V. Farahani, Francisco Barros, Pedro J. Sousa, Pedro P. Cacciari, Paulo J. Tavares, Marcos M. Futai and Pedro 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, 102995. 2019.
- (6) Hiroshi Higuchi, Hiromitsu Fujii, Atsushi Taniguchi, Masahiro Watanabe, Atsushi Yamashita and Hajime 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. 2019.
- (7) Momoko Kawata, Hiroshi Higuchi, Sarthak Parthak, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, “Scale optimization of structure from motion for structured light-based all-round 3D measurement”, *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 442–449. 2021.
- (8) Christopher Mei and Patrick Rives, “Single view point omnidirectional camera calibration from planar grids”, *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3945–3950. 2007.
- (9) S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F.J. Madrid-Cuevas and R. Medina-Carnicer, “Generation of fiducial marker dictionaries using mixed integer linear programming”, *Pattern Recognition*, vol. 51, pp. 481–491. 2016.
- (10) Francisco J. Romero-Ramirez, Rafael Muñoz-Salinas and Rafael Medina-Carnicer, “Speeded up detection of squared fiducial markers”, *Image and Vision Computing*, vol. 76, pp. 38–47. 2018.