

クロスラインレーザとカメラを併用した ロックボルト孔の位置および方向計測*

速水桃子** 伊賀上卓也** 井倉幹大** 樋口 寛** ルイ笠原純ユネス†
伊藤 哲*** 谷口信博*** 森野弘之† 吉田健一*** 浅間 一‡ 山下 淳‡

Position and Direction Measurement of Rock Bolt Hole Using Cross Line Laser and Camera

Toko HAYAMIZU, Takuya IGAUE, Mikihiro IKURA, Hiroshi HIGUCHI, Jun Younes LOUHI KASAHARA
Satoshi ITO, Nobuhiro TANIGUCHI, Hiroyuki MORINO, Kenichi YOSHIDA, Hajime ASAMA and Atsushi YAMASHITA

In this paper, we propose a new position and direction measurement method of rock bolt hole with a cross line laser. A combination of the light-sectioning method and a hole detection in an image is used to estimate a hole position and direction. Experimental results in a tunnel under construction show that the proposed method can measure positions and directions with high accuracy.

Key words: cross line laser, 3D position measurement, hole direction measurement

1. 序 論

山岳トンネル施工時によく用いられる工法として、New Austrian Tunneling Method (NATM 工法)¹⁾²⁾がある。この工法は、発破したトンネルの地山を吹き付けコンクリートおよびロックボルトにより支保することでトンネル強度を高めている。ここでロックボルト打設は、吹付コンクリートおよび地山に対し、ロッドを用いて削孔した長尺の孔にモルタルを充填し、ロックボルトを挿入する作業である。現在ロックボルト打設は作業員が人力で行っているが、粘性の高いモルタルが詰まった3-5 mの細長い孔に約20 kgと重量の大きいロックボルトを挿入する苦渋労働であるため、機械化が望まれている。

ロックボルト打設を自動化する手法として、ロックボルト孔の削孔、モルタル注入、ロックボルトの挿入を同一のアームで実現する手法³⁾が研究開発されている。この手法では、削孔から打設までアームを同一の姿勢で保持するため、削孔時のロックボルト孔の位置および方向を計測することなくロックボルト打設を行っている。一方、ロックボルト孔の削孔と、モルタル注入およびロックボルト打設を異なる機械で自動化する手法^{4)~6)}も提案されている。ロックボルト孔の削孔と、モルタル注入およびロックボルト打設を異なる機械で自動化する手法における機械の入れ替わりの様子を図1に示す。これらの手法では、より小型な機体で自動化を実現できる一方、図1のように、削孔後に削孔機と打設機が場所を入れ替わるため、孔の位置および方向の情報が失われる。現在は作業員の目視によりロックボルト先端と孔の位置合わせが行われているが、作業効率向上のため自動化が期待されている。

位置合わせ作業の自動化を実現するためには、孔の3次元座

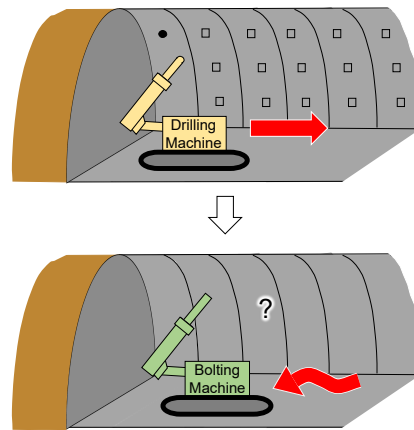


Fig. 1 Drilling machine and bolting machine changing places.

標および方向を計測する必要がある。このとき、ロックボルト孔がある壁面付近は湧き水等の影響によりセンサを取り付けることができない。そのため、ロックボルト孔の計測は遠方から行う必要がある。

壁面に開いた孔の方向を求める手法として、2台のカメラを用いた手法⁷⁾がある。この手法では、ステレオ法により孔口の輪郭の楕円形状の3次元座標を計測する。その後、輪郭から孔中心に向かうベクトルが孔の方向と直交していることを利用して孔の方向を計測している。また、レーザ測距計を用いて孔の方向を求める手法⁸⁾では、投影した孔口が真円になる2通りの平面を求め、レーザ測距計により孔周辺の2点の3次元座標を計測することで平面を一意に定めることで、孔の方向を計測している。レーザ測距計の代わりに孔内のグラデーションを用いることで、投影した孔口が真円になる平面を一意に定め、1台のカメラのみで孔の方向を求める手法⁹⁾がある。この手法では、孔内と孔外が連続な部分と、非連続な部分の光の当たり方の違いによって生じるグラデーションから孔の方向を一意に定めている。これらの手法では、孔口の形状から孔方向を計測できる一方、孔が壁面に対し垂直に開いているとの仮定をお

* 原稿受付 令和4年7月11日

掲載決定 令和5年1月13日

** 学生会員 東京大学大学院(東京都文京区本郷7-3-1)

*** 大林組土木本部生産技術本部(東京都港区港南2-15-2)

† 大林組ロボティクス生産本部(東京都港区港南2-15-2)

‡ 正会員 東京大学大学院

いている。しかし、実際に削孔された孔の方向と壁面の方向は必ずしも垂直ではない。このことから、孔口の形状のみを用いて孔方向を高精度に計測することは困難であると考えられる。

孔に対する3次元座標計測手法として、Moら¹⁰⁾は、ToFカメラを用いた孔検出および孔の3次元計測手法を提案した。建設現場における実験を行い、カメラと孔の距離が50 cmである条件下で3次元座標を高精度に計測可能であることを示した。また、Wuら¹¹⁾は2台のカメラで平面上の複数の孔を撮影し、ステレオ法により3次元座標計測を行うことが可能であることを示した。しかしこれらの手法は、カメラと孔の距離が近い場合を想定しており、遠距離にあるロックボルト孔の検出および3次元座標計測には適していない。画像内に直径が既知の孔がある場合、単眼カメラのみを用いて孔の3次元座標を計測する手法⁹⁾がある。この手法では、5 m 遠方から孔の3次元座標を計測可能であることを示したが、画像内に孔径が既知である孔が存在する必要がある。しかし、ロックボルト孔は削孔時の振動等により、孔径にばらつきが生じる。このため、削孔に用いるロッドの直径と孔径は必ずしも同一ではなく、ロッド径を孔径として用いると誤差が生じることから、孔径を用いた計測では誤差が大きくなる恐れがある。一方、光切断法は、投影したレーザ光を既知の間隔にあるカメラで撮影し、画像上のレーザ光位置から三角測量の原理を用いて3次元座標を計測する。そのため、孔径に依存せず、高精度に3次元座標を計測可能である。また、計測にカメラを用いることから、レーザ光が投影された壁面の画像を得ることができるため、3次元座標計測と同時に壁面上のロックボルト孔自体を撮影可能である。

以上から、本論文では、レーザとカメラを用いて遠方からトンネル壁面にある削孔済みのロックボルト孔の方向および3次元座標を高精度に計測することを目的とする。

2. 提案手法

2.1 提案手法のコンセプト

壁面に開いたロックボルト孔とロックボルト先端の位置合わせを実現するためには、ロックボルト孔の3次元座標および方向を計測する必要がある。ここで、ロックボルト孔を計測するためには、ロックボルト孔を検出する必要がある。金井ら⁶⁾は、レーザを用いてロックボルト孔とロックボルト先端の位置合わせを行った。しかし、レーザのみでロックボルト孔を検出することはできないため、現在は目視により孔検出が行われている。そこで本研究では、カメラ画像を用いてロックボルト孔の検出を行う。

ここで、既知の孔径と画像内の孔径の関係から孔の3次元座標を計測する手法⁹⁾は、削孔時の振動などにより、削孔済みの孔径が想定した孔径と異なることから位置計測精度が低くなる。この問題点を解決するため、本研究ではレーザを用いて3次元座標を計測する手法を提案する。

提案手法の装置概要を図2に示す。図2のように、壁面に対して斜めから孔を撮影した場合、孔は楕円形状に見える。孔口が楕円形状に見える原因は2つある。1つ目はカメラと壁面の関係によるものである。壁面に対して孔が垂直に開いているとき、壁面に対し垂直な位置から見た孔口形状は真円である。このとき、壁面に対して斜めから孔を撮影すると、孔は楕円形状に見える。2つ目の原因は孔と壁面の関係によるものである。壁面に対して孔が斜めに開いているとき、壁面に対し垂直な位置から見た孔口形状は楕円形である。一般に、ロックボルト孔

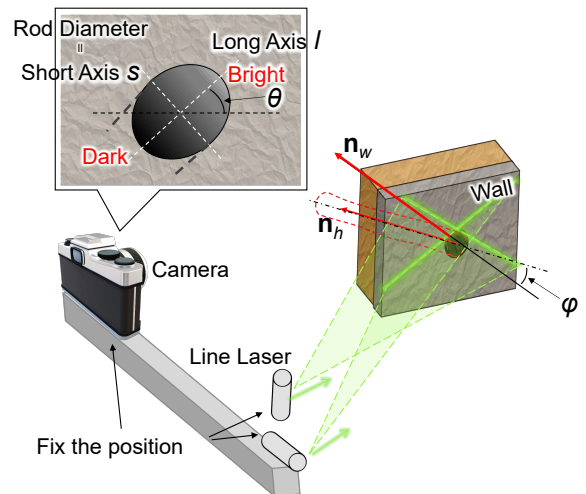


Fig. 2 Overview of the equipment used in proposed method.

は壁面に対して垂直に開いていないため、壁面に対して斜めから撮影した際の孔口形状は、カメラと壁面の関係と孔と壁面の関係の両方の影響を受ける。画像中の孔口の楕円形状を用い、短軸長さと同軸長さの関係から孔の方向を計測する手法では、計測に使用する孔口形状に対し、カメラと壁面の関係と孔と壁面の関係の両方の影響を受けるため、正しい孔の方向を計測することができない。この問題点を解決するため、本研究ではレーザを用いて壁面の平面の方向を計測する。

レーザを用いた光切断法では、対象物体のうちレーザ光が投影された部分の3次元座標のみが計測できる。このため、1本のラインレーザを用いて壁面の計測を行った場合、線上の3次元座標しか計測することができず、壁面の平面を計測することができない。そこで本研究では、壁面の平面を計測するため、壁面に2本の交差したレーザ光を照射できるクロスラインレーザを使用し、その3次元座標を取得する。

以上より、本手法では、クロスラインレーザを用いて壁面上のレーザ光が投影された位置の3次元座標を計測し、壁面の平面を計測する。また、カメラ画像を用いて孔を検出する。次に、クロスラインレーザを用いて計測した壁面の平面のカメラに対する角度、および、カメラ画像内の孔口の楕円形状を用いて計測したカメラに対する孔の方向を併用することにより、孔の方向を計測する。さらに、カメラ画像内で検出した孔中心と計測した壁面の平面の距離情報を併用することにより、孔中心の3次元座標を計測する。

2.2 提案手法の概要

提案手法の処理概要を図3に示す。孔中心の3次元座標計測および孔の方向計測のため、本手法ではレーザ光を壁面に照射し、壁面の平面を計測する。対象物体などの背景の影響を受けずにレーザ光のみを抽出するため、レーザ照射時とレーザ非照射時の画像を同一地点から取得し、差分をとることで、レーザ光のみが含まれた画像を作成する。ここで、レーザ光を照射して撮影した画像をレーザオン画像、レーザ光を照射せずに撮影した画像をレーザオフ画像とする。また、作成したレーザ光のみが含まれる画像をレーザ画像とする。レーザ画像から、レーザ点を抽出し、光切断法に基づく3次元座標を算出する。算出したレーザ点の3次元座標をもとに、壁面の平面を計測する。同時に、孔中心の画像座標を算出し、孔口形状を計測するため、レーザオフ画像に対し、孔検出を行う。最後に、壁面の平面の

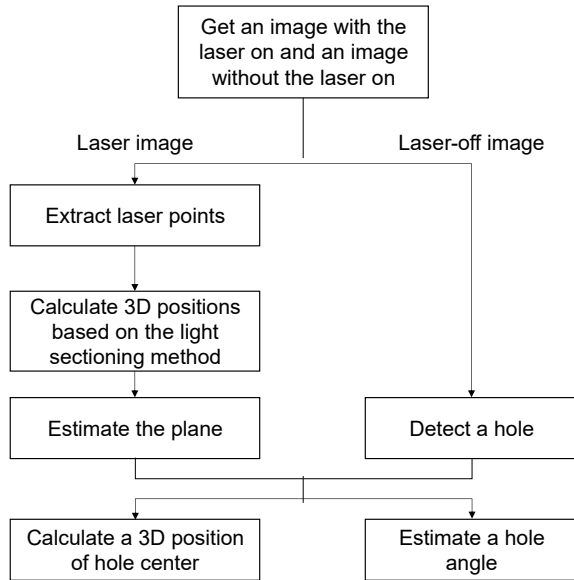


Fig. 3 Overflow of the proposed method.

計測結果および孔検出により計測した孔中心の画像座標、孔口形状を用いて孔の方向計測および孔中心の3次元座標計測を行う。ここで、壁面に対して角度をつけて削孔した際の孔口は、削孔に用いたロッドにより壁面が削られることから楕円形状になる。よって、壁面に対する孔の方向は、孔口形状である楕円形を短軸周りに回転させ、長軸が短軸と同一長さになる際の角度から計測できる。

2.3 光切断法による壁面の平面計測

光切断法では対象物体に投影されたレーザー光の位置の3次元座標を計測する。本研究では、壁面の平面を計測するため、壁面に2本のレーザー光を照射し、その3次元座標を取得する。ただし、照射された2本のレーザー光はカメラの画角内に収まっているとする。平面計測は、差分によるレーザー画像の取得、レーザー光の画像座標取得、レーザー光投影位置の3次元座標の算出、3次元座標をもとにした壁面の平面計測の手順で行う。

光切断法において、3次元計測のためには画像内に写る対象物体やレーザー光の中から、投影されたレーザー光のみを抽出する必要がある。対象物体や背景からレーザー光のみを抽出するため、本研究では、レーザー光を投影した対象物体およびレーザー光を投影していない対象物体を同一位置から撮影し、その差分をとることにより、レーザー画像を取得する。この手法により、レーザー光が視認しにくい条件においても、レーザー光のみを抽出することが可能である。ここで、孔内に投影されたレーザー光は計測対象である壁面の平面とは異なる平面にあるため、除去する必要がある。孔内に投影されたレーザー点を除去するため、レーザーオフ画像から2.4節に示す手法に基づき孔を検出し、孔内の領域内にあるレーザー点を除去する。

レーザー光の抽出により、2本のレーザー光が含まれたレーザー画像が得られる。ここで、2本のレーザー光はそれぞれ異なるレーザー平面上にあるため、光切断法を用いて3次元座標を計測するためには、それぞれを独立して扱う必要がある。そのため、レーザー画像を2つの領域に分割し、レーザーごとのレーザー画像を作成する。作成した各レーザー画像に対し、輝度重心を算出することで、レーザー点の画像座標 (u, v) を得る。

次に、レーザー点の画像座標をもとに3次元座標を算出する。レーザー平面とカメラ原点の関係を図4に示す。あるレーザー点の

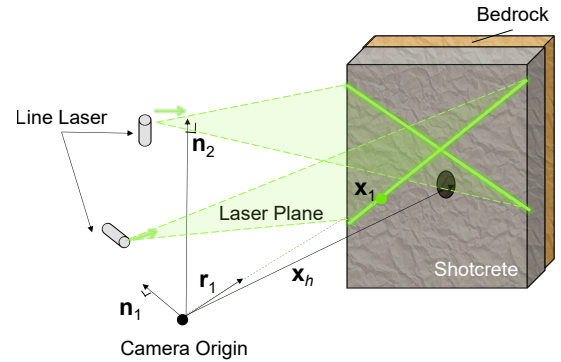


Fig. 4 Relationship between the laser plane and a camera coordinate.

画像座標 (u_p, v_p) はカメラ座標系において3次元座標 \mathbf{x}_p をとるとき、 \mathbf{x}_p は光線ベクトル \mathbf{r}_p を用いて式(1)と表される。

$$\mathbf{x}_p = s_p \mathbf{r}_p, \quad (1)$$

ここで、 s_p は係数、 p は1~ v とし、 v は1本のレーザー光上のレーザー点数である。

式(1)より、レーザー点の画像座標 (u_p, v_p) の3次元座標 \mathbf{x}_p を求めるためには、変数 s_p を決定する必要がある。光切断法において、レーザー光の対象物体上の投影点は、レーザー平面上にある。よって、 \mathbf{x}_p が l 番目のレーザー平面上にあるとき、 \mathbf{x}_p は式(2)と表される。

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

ただし、 \mathbf{n}_l はカメラ座標原点からレーザー平面におろした垂線とする。また、本研究では2本のレーザーを使用するため、 l は1または2である。

式(2)に式(1)を代入することにより、変数 s_p を一意に定めることができ、レーザー光の投影点の3次元座標 \mathbf{x}_p を求めることができる。

算出したレーザー光投影点群の3次元座標に対し、最小二乗平面を求めることにより、壁面の平面を計測する。

2.4 画像上の孔中心検出

孔内部には光が当たらないことから、周囲の壁面と孔内部では輝度差が生じる。このことから、画像中の輝度差を用いて孔を検出する。また、画像中で孔口は楕円形状に見えることから、孔に対し楕円フィッティングを行うことで孔中心を計測する。画像内に含まれている1つの孔を検出する手法を以下に示す。

- レーザーオフ画像に対し、大津による閾値選定法¹²⁾を用いて2値化画像を作成
- 作成した2値化画像に対し、鈴木らによる輪郭検出¹³⁾により輪郭を取得
- 領域の面積に対する閾値を用いて、輪郭生成処理で得られた領域からノイズを除去
- 壁面との対象となる領域のうち、領域内の輝度の平均値が最も小さい領域をロックボルト孔として選定
- 選定した領域に対し、以下の楕円フィッティングを行い楕円の式を算出

ここで、(c)の閾値は、既知であるロックボルト孔の直径に基づき、カメラ画像内でのロックボルト孔面積の最小値を算出することにより決定する。また、(d)ではロックボルト孔は深い孔状であり、光が内部に届かないことから周囲の壁面より暗

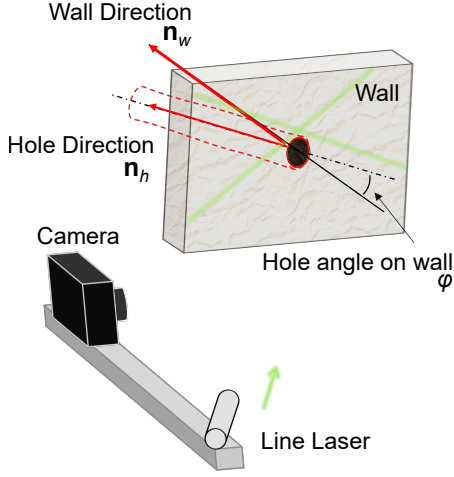


Fig. 5 Relationship between the hole direction and wall direction.

くなるため、周囲の壁面と孔内部では輝度差が生じることを用いて選定する。

(e) の楕円フィッティングについて、算出方法を以下に述べる。楕円の式の係数を a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 とすると、式 (3) のように $\mathbf{a} = [a_1, a_2, a_3, a_4, a_5]^T$ について輪郭の各点との距離を最小化することにより、最小二乗法から楕円の式の係数を決定できる。

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a}} \sum_{i=1}^{N_j} (u_i^2 + a_1 u_i v_i + a_2 v_i^2 + a_3 u_i + a_4 v_i + a_5)^2, \quad (3)$$

ここで、 N_j は j 番目の輪郭を構成する点の総数とする。

式 (3) により得られた $a_1 \sim a_5$ を用いて、楕円の中心点 (u_c, v_c) および長軸の u 軸からの角度 θ は式 (4), (5), (6) と表される。

$$u_c = \frac{a_1 a_4 - 2a_2 a_3}{4a_2 - a_1^2}, \quad (4)$$

$$v_c = \frac{a_1 a_3 - 2a_4}{4a_2 - a_1^2}, \quad (5)$$

$$\theta = \frac{\arctan\left(\frac{a_1}{1-a_2}\right)}{2}. \quad (6)$$

2.5 ロックボルト孔の方向計測

カメラから見た孔の方向と壁の関係を図 5 に示す。また、壁面に対して斜めに開いた孔の様子を図 6 に示す。図 5 のように、壁面に対して角度を持って削孔した場合、削孔された孔は図 6 のような楕円形となる。画像内の孔口形状の楕円形を壁面に対して正面から見た場合の形状に変換し、壁面上の孔口形状に変形した楕円形状の短軸周りに、長軸が短軸と同じ長さになるまで回転させたときの角度が、壁面に対する孔の方向である。

画像内の孔口形状を壁面に対して正面から見た場合の形状に変換するため、孔口形状の楕円形の短軸および長軸の端点が壁面上に位置することを利用し、孔中心の 3 次元座標計測と同様に各点の 3 次元座標を計測する。変換前の端点を変換後の端点の位置に移動させるような透視変換行列を求め、この行列により画像を変換することで壁面に対し正面から見た画像を作成する。作成した画像に対し、2.3 節で述べた孔検出手法を適用することにより、壁面に対し正面から見た孔口形状を計測する。

壁面に対する孔の方向ベクトル \mathbf{n}_h は、ロドリゲスの回転公

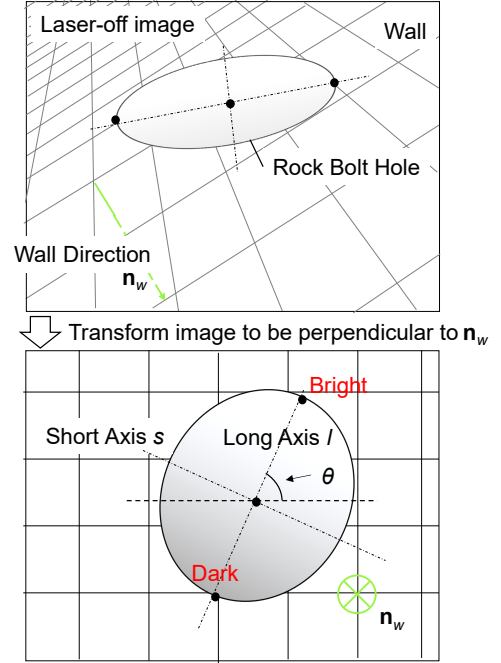


Fig. 6 Transformation of the image to get an image perpendicular to wall.

式により法線と角度を用いて算出した回転行列 \mathbf{R} を用いて式 (7) と表される。ここで、回転角度 ϕ は、回転後の画像内における孔口の楕円形状の長軸の長さ l 、短軸の長さ s を用いて式 (8) と表される。

$$\mathbf{n}_h = \mathbf{R} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix}, \phi \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\phi = \arccos\left(\frac{l}{s}\right). \quad (8)$$

ここで、角度 ϕ は正負の 2 通り考えられ、一意に定める必要がある。通常、削孔機は坑口側から切羽側に向かって削孔を行うことから、ロックボルト孔は切羽側に傾いて削孔される。このことから、角度 ϕ は負とする。

よって、正負を一意に定めた角度 ϕ を式 (7) に代入することにより、壁に対する孔の方向ベクトル \mathbf{n}_h を計測する。

2.6 光切断法による孔中心の 3 次元座標計測

孔中心は壁面の平面上にあることから、画像内で検出した孔中心の画像座標と、光切断法により計測した壁面の平面の関係を用いて、孔中心の 3 次元座標を計測できる。

2.4 節で算出した孔中心の画像座標 (u_c, v_c) および、2.3 節で算出した \mathbf{n}_w で表される壁面の平面を用いて、孔中心の 3 次元座標 \mathbf{x}_h は、式 (9) と表される。

$$\mathbf{n}_w^T (\mathbf{x}_h - \mathbf{n}_w) = 0. \quad (9)$$

ここで、孔中心の 3 次元座標 \mathbf{x}_h は、光線ベクトル \mathbf{r}_h を用いて式 (10) と表される。

$$\mathbf{x}_h = s_h \mathbf{r}_h, \quad (10)$$

ただし、 s_h は係数である。式 (9) に式 (10) を代入することで変数 s_h は以下のようにあらわされる。

$$s_h = \frac{1}{\mathbf{n}_w^T \mathbf{r}_h}. \quad (11)$$

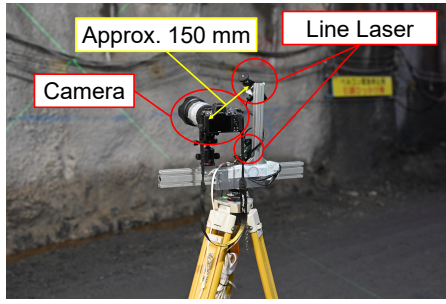


Fig. 7 Equipment used for the experiment.

また、光線ベクトル \mathbf{r}_h はカメラの内部パラメータ \mathbf{K} を用いて式 (12) のように求められる。ただし、カメラの内部パラメータ \mathbf{K} は画像中心 (c_x, c_y) 、焦点距離 f_x, f_y を用いて式 (13) のように表される。

$$\mathbf{r}_h = \mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

よって、式 (10) に式 (11), (12) を代入することで孔中心の 3 次元座標 \mathbf{x}_h は以下のように求められる。

$$\mathbf{x}_h = \frac{\|\mathbf{n}_w\| \mathbf{r}_h}{\mathbf{n}_w^T \mathbf{r}_h}. \quad (14)$$

3. 実験

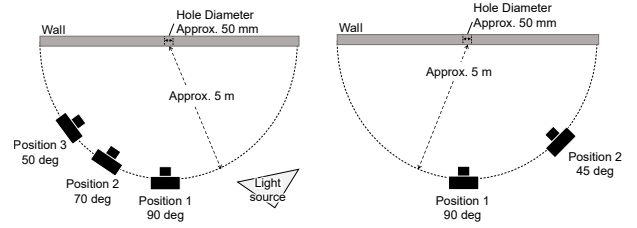
3.1 実験方法

提案手法の有効性を検証するため、実験室内および建設中のトンネルにて実験を行った。実験に使用した装置を図 7 に示す。装置は望遠レンズを取り付けたカメラ、および交差するように取り付けた 2 本のラインレーザで構成した。幅広い距離での計測に対応するため、カメラとレーザの基線長を短く設定することにより、より多くの範囲でレーザ光の交点が画角に収まるように調整した。使用したカメラは Nikon Z7II であり、レンズは AF-S NIKKOR 70-200 mm である。また、焦点距離は 200 mm、解像度は 8256×5504 ピクセルとした。カメラと撮影対象の距離が 5 m のとき、撮像範囲は約 0.9 m×0.6 m である。

実験は、各計測について以下の手順で行った。まず実験装置を指定の位置に設置し、レーザ光を投射してレーザオン画像を撮影した。次に装置を移動させずにレーザ光を消し、レーザオフ画像を撮影した。以上の手順を各条件について繰り返した。

また、提案手法の計測精度を従来手法の計測精度と比較するため、カメラのみを用いた手法⁹⁾による計測を同時に行った。従来手法による計測では、撮影したレーザオフ画像に対し、2.4 節で述べた手法を適用して孔を検出した。その後、孔として検出した楕円の長軸長さが、孔径と同一であるという仮定に基づき、既知の孔径と長軸長さの関係から孔中心の 3 次元座標を計測した。また、長軸長さと短軸長さの比から孔の方向を計測した。

実験条件を図 8 に示す。壁面に対するカメラの角度が変化することによる計測精度への影響を検証するため、カメラと孔の距離を固定し、カメラと壁面の角度を変えて実験を行った。ここで、カメラと孔の距離は約 5 m とした。なお、計測地点は孔



(a) Measurement in the lab. (b) Measurement in the tunnel.
Fig. 8 Experimental conditions.

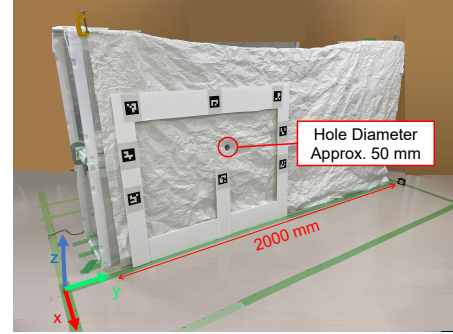


Fig. 9 Measurement target used in the experiment conducted in the lab.

との距離および壁との距離をレーザ測距計で計測することにより決定した。

3.1.1 実験室内での実験

実験室内での実験時は、孔から約 6.5 m 離れた位置に 2 台の照明を設置し、計測を行った。

実験室内の実験で使用した計測対象を図 9 に示す。図 9 のように、トンネル壁面を模した紙製の壁面にあけた、直径約 50 mm の孔を計測対象とした。また、図 8 (a) のように壁の正面である 90 deg の位置を地点 1 とし、壁の左斜め前の 70 deg の位置を地点 2、50 deg の位置を地点 3 とした。

3.1.2 トンネル内での実験

トンネル内での実験時には、トンネル内部に備え付けられた蛍光灯環境下で計測を行った。

また、トンネル内で行った計測では、図 8 (b) のように地点 1 は壁の正面である 90 deg の位置とし、地点 2 は壁の右斜め前である 45 deg の位置とした。ここで、壁面にレーザ光を投影した際、レーザが孔内に投影される場合と孔外に投影される場合が考えられる。レーザが投影される位置が計測精度に及ぼす影響を検証するため、各地点において、レーザ光が孔内に投影されている条件とレーザ光が孔内に投影されていない条件の 2 通りの条件で計測を行った。また、実験にはコンクリートの厚さを計測するために用いる直径約 50 mm の孔を使用した。ここで、広く用いられているロックボルト径は約 30 mm であるため、ロックボルトとロックボルト孔のクリアランスは ± 10 mm である。よって、ロックボルト先端をロックボルト孔に挿入するためには、孔中心の 3 次元座標のうち xy 成分からなる 2 次元誤差が ± 10 mm 以下である精度で計測する必要がある。また、ロックボルト先端をロックボルト孔に 50 mm 挿入するためには、 ± 25 deg の精度で孔方向を計測する必要がある。

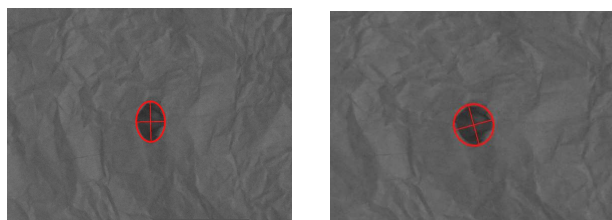
3.2 真値取得

3.2.1 実験室内での実験

提案手法による計測の精度を検証するため、レーザ測距計を用い、孔の周囲に設置した AR マーカ原点の 3 次元座標および



Fig. 10 Measurement using TS.



(a) Previous method⁹⁾.

(b) Image after transformation.

Fig. 11 Hole detection result in the experiment conducted in the lab.

孔中心の3次元座標を計測した。ここで、図9に示すように、壁面の左下を座標系の原点とし、壁面に垂直方向をx軸、壁面に平行な方向をy軸、地面に鉛直上向き方向をz軸とした。

3.2.2 トンネル内での実験

提案手法による計測の精度を検証するため、トータルステーション (TS) を用いて、孔の周囲に設置したARマーカー原点の3次元座標および孔中心の3次元座標を計測した。TSを用いて孔の計測している様子を図10に示す。図10のようにマーカーを2か所取り付け付けた棒を孔に差し込み、マーカー位置を計測することにより、孔の方向を計測した。使用したTSはTOPCON GTseriesである。

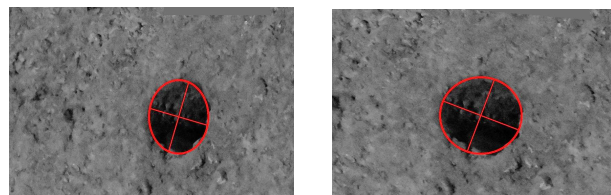
3.3 実験結果と考察

3.3.1 実験室内での実験

レーザオフ画像に対して行った従来手法における孔検出結果および、変換後の画像に対して行った提案手法における孔検出結果のうち、検出した孔付近を拡大した画像を図11に示す。図11(a)のように、従来手法において、壁面から斜めの位置から撮影した際の孔口はカメラと壁面の関係を含んだ形状となっている。提案手法により、光切断法を用いて計測した壁面の平面を用いて、壁面に対し正面から見た画像に変換することにより、図11(b)のような孔口形状を得た。

孔方向の真値、カメラのみを用いて計測した孔方向、および提案手法により計測した孔方向を比較し、評価を行った。ここで、レーザ測距計を用いて計測した孔方向を真値とした。また、各条件において5回計測を行い、平均値を代表値とした。計測結果の真値との誤差を表1に示す。表1より、従来手法ではすべての条件においてロックボルト孔にロックボルト先端を挿入するために必要な精度である $\pm 25 \text{ deg}$ 以内での計測が達成できなかったが、提案手法を用いることにより、全ての条件において目標精度以内での計測を達成した。このことから、提案手法による計測結果により、ロックボルト先端をロックボルト孔に挿入可能であることを示した。

孔中心の3次元座標の真値、カメラのみを用いて計測した孔中心の3次元座標および提案手法により計測した孔中心の3次



(a) Previous method⁹⁾.

(b) Image after transformation.

Fig. 12 Hole detection result in the experiment conducted in the tunnel.

元座標を比較し、評価を行った。ここで、実験ではレーザ測距計を用いて計測した孔中心の3次元座標を真値とした。また、各条件において5回計測を行い、平均値を代表値とした。真値、計測結果および xy 成分の誤差からなる2次元誤差を表2に示す。ここで、2次元誤差 e は計測値の x, y 成分である x, y および真値の x, y 成分である x_t, y_t を用いて式(15)のように算出した。

$$e = \sqrt{(x - x_t)^2 + (y - y_t)^2}. \quad (15)$$

表2より、従来手法による計測では、 50 deg から撮影した地点3の条件でロックボルト先端をロックボルト孔に挿入するために必要な精度である $\pm 10 \text{ mm}$ の精度を満たせなかった。一方、提案手法を用いることにより、地点1、地点2の全ての条件において、要求精度以下での計測を達成した。このことから、提案手法による計測により、ロックボルト先端をロックボルト孔に挿入することが可能であることを示した。

3.3.2 トンネル内での実験

レーザオフ画像に対して行った従来手法における孔検出結果および、変換後の画像に対して行った提案手法における孔検出結果のうち、検出した孔付近を拡大した画像を図12に示す。図12(a)のように、従来手法において、壁面から斜めの位置から撮影した際の孔口はカメラと壁面の関係を含んだ形状となっている。提案手法により、光切断法を用いて計測した壁面の平面を用いて、壁面に対し正面から見た画像に変換することにより、図12(b)のような孔口形状を得た。

光切断法により計測した壁面の平面の方向と真値との誤差を表3に示す。ここでは、TSを用いて計測した8点のARマーカー原点から算出した壁面の平面の方向を真値とした。表3より、地点1、地点2ともに高精度に壁面の方向を計測できた。

孔方向の真値、カメラのみを用いて計測した孔方向、および提案手法により計測した孔方向を比較し、評価を行った。ここでは、TSを用いて計測した孔方向を真値とした。また、レーザが孔内に入ることによる計測精度への影響を評価するため、レーザが孔内に照射されている場合、およびレーザが孔外に照射されている場合について評価を行った。

計測結果の真値との誤差を表4に示す。表4より、従来手法では地点1での計測においてロックボルト孔にロックボルト先端を挿入するために必要な精度である $\pm 25 \text{ deg}$ 以内での計測が達成できなかったが、提案手法を用いることにより、地点1、地点2の全ての条件において目標精度以下での計測を達成した。また、レーザの照射位置による精度への影響は見られなかった。このことから、提案手法による計測結果により、ロックボルト先端をロックボルト孔に挿入可能であることを示した。

提案手法によりレーザオフ画像に対して行った画像処理の様子を図13に示す。レーザオフ画像から作成した2値化画像に

Table 1 Error of hole direction measurement conducted in lab. deg.

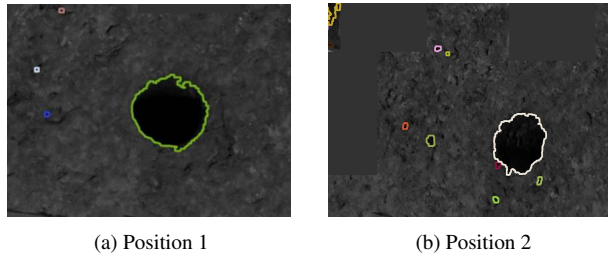
	Position 1	Position 2	Position 3
Previous method ⁹⁾	28.2	62.4	94.9
Proposed method	24.4	23.6	23.8

Table 2 Error of hole center 3D measurement conducted in lab. mm

	Position 1	Position 2	Position 3
Previous method ⁹⁾	8.6	8.4	16.8
Proposed method	5.6	4.1	2.3

Table 3 Error of wall direction measurement. deg.

Position 1		Position 2	
Laser in the hole	Laser out of the hole	Laser in the hole	Laser out of the hole
3.9	2.0	1.4	3.2

**Fig. 13** Hole detection result in the experiment conducted in the tunnel.

対し、輪郭検出を行うことにより、図 13 のように孔の候補となる輪郭を得た。

孔中心の 3 次元座標の真値、カメラのみを用いて計測した孔中心の 3 次元座標および提案手法により計測した孔中心の 3 次元座標を比較し、評価を行った。ここで、TS を用いて計測した孔中心の 3 次元座標を真値とした。また、レーザが孔内に入るることによる計測精度への影響を評価するため、レーザが孔内に照射されている場合、およびレーザが孔外に照射されている場合について評価を行った。真値、計測結果および xy 成分の誤差からなる 2 次元誤差を表 5 および表 6 に示す。表 5 および表 6 より、従来手法による計測では、地点 2 のレーザが孔外にある条件以外ではロックボルト先端をロックボルト孔に挿入するために必要な精度である ± 10 mm の精度を満たせなかった。一方、提案手法を用いることにより、地点 1、地点 2 の全ての条件において、要求精度以下での計測を達成した。このことから、提案手法による計測により、ロックボルト先端をロックボルト孔に挿入することが可能であることを示した。

4. 結 論

本論文では、光切断法による 3 次元計測とカメラ画像による孔検出を併用し、遠方にあるロックボルト孔の 3 次元座標および方向を計測する手法を提案した。また、提案手法の実現性を確認するために実験室内、および、建設中のトンネルで実験を行った。実験では、5 m 遠方の壁面上に開いた直径約 50 mm の孔に対し計測を行った。実験室内の実験結果から、地点 1、地点 2、地点 3 の全ての条件において、従来手法では達成できなかった、目標精度である ± 25 deg 以内での孔方向の計測および 2 次元誤差 ± 10 mm 以内での孔中心の 3 次元計測を達成した。

また、トンネル内での実験結果から、地点 1、地点 2 の全ての条件において、従来手法では達成できなかった、目標精度である ± 25 deg 以内での孔方向の計測を達成した。また、孔中心の 3 次元座標計測についても、地点 1、地点 2 の全ての条件において、従来手法では達成できなかった目標精度である 2 次元誤差 ± 10 mm 以内での計測を達成した。このことから、提案手法による計測結果を用いて、ロックボルト孔に対しロックボルト先端の挿入が可能であることを示した。

本論文では、ロックボルト先端をロックボルト孔に挿入するために必要な精度での孔の方向および 3 次元座標の計測を行った。しかし、ロックボルト打設時には、長尺で凹凸のあるロックボルト孔に対し、長尺で先端がとがっているロックボルトの全体を押し込む必要がある。ここで、ロックボルトを一定方向に押し込んだ場合、ロックボルト先端がロックボルト孔内に固えてしまう恐れがあるため、打設時にはロックボルト先端の固えを解消するための制御が必要となる。提案手法による計測結果はロックボルト先端をロックボルト孔に挿入する際には有効であるが、ロックボルト先端の固えを判別することはできず、ロックボルト全体を打設するための制御を実現することは困難である。そのため、今後は、ロックボルト孔にロックボルト先端を挿入後、ロックボルト全体を打設するための手法の構築を目指す。

謝 辞

実験場所として犬打峠トンネル（仮称）をご提供いただいた京都府山城北土木事務所に感謝の意を表す。また、本研究の一部は JSPS 科研費 22K18826 の援助を受けた。

参 考 文 献

- 1) S. Tomita, T. Kobayashi, T. Ushiomura, Y. Takiuchi and M. Niizeki: Construction of natm tunnel crossing right under existing railway tunnel, Proceedings of Tunnel Engineering, JSCE, **6** (1996) 235.
- 2) M. Karakuş and R. Fowell: An insight into the new austrian tunnelling method (natm), Proceedings of the 7th Regional Rock Mechanics Symposium, Sivas (2004).
- 3) M. Ishimura, N. Azetsu, Y. Yamaguchi, N. Ikushima, H. Mikami and R. Wakatake: Initiatives for automation of rockbolting in mountain tunneling, 土木学会 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会講演概要集 (2021) VI-679.
- 4) S. Miyamoto and Y. Tomono: Development of 6m joint rockbolt driving device, 土木学会 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会講演概要集 (2021) VI-904.
- 5) K. Kawamoto, Y. Koga and S. Miyamoto: How to minimize the labor force by introducing 6m joint rockbolt driving device into the natm tunnel construction site, 土木学会 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会講演概要集 (2021) VI-905.
- 6) 金井俊二, 大西吉美, 川元健太郎, 宮本真吾: ロックボルト専用機「ボルティンガー」の採用による安全性及び生産性の向上, 土木建設技術発表会 2021 講演概要集 (2021).
- 7) J.-W. Seo, K.-E. Kim and K. Roh: 3d hole center and surface normal estimation in robot vision systems, Proceedings of the 2020

Table 4 Error of hole direction measurement conducted in the tunnel. deg.

	Position 1		Position 2	
	Laser in the hole	Laser out of the hole	Laser in the hole	Laser out of the hole
Previous method ⁹⁾	32.5	31.5	7.1	8.6
Proposed method	7.8	16.0	17.3	20.6

Table 5 Results and errors of hole 3D measurement conducted in the tunnel. (Position 1) mm

	Laser in the hole		Laser out of the hole	
	(x, y, z)	2D error	(x, y, z)	2D error
True value	(58.2, 120.6, 5297.2)	-	(-18.3, 128.0, 5283.3)	-
Previous method ⁹⁾	(49.3, 105.5, 4568.0)	17.5	(-16.1, 112.2, 4588.0)	16.0
Proposed method	(56.9, 121.7, 5270.8)	1.7	(-18.5, 128.9, 5271.3)	0.9

Table 6 Results and errors of hole 3D measurement conducted in the tunnel. (Position 2) mm

	Laser in the hole		Laser out of the hole	
	(x, y, z)	2D error	(x, y, z)	2D error
True value	(74.6, 118.0, 5295.5)	-	(69.7, 77.5, 5299.5)	-
Previous method ⁹⁾	(68.2, 104.5, 4614.9)	14.9	(65.4, 70.2, 4698.6)	8.5
Proposed method	(78.0, 120.0, 5341.6)	3.9	(74.3, 79.8, 5338.8)	5.1

IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (2020) 355.

- 8) Q. Zhang, J. Liu, S. Zheng and C. Yu: A novel accurate positioning method of reference hole for complex surface in aircraft assembly, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **119**, 1 (2022) 571.
- 9) 速水桃子, 伊賀上卓也, 井倉幹大, 樋口 寛, ルイ笠原純ユネス, 伊藤 哲, 谷口信博, 森野弘之, 吉田健一, 山下 淳, 浅間 一: 孔口の楕円近似に基づくカメラ画像を用いたロックボルト孔の位置および角度推定, "動的画像処理実用化ワークショップ 2022 講演論文集, (2022) 18.
- 10) Y.-H. Mo, T.-K. Kang, H.-Z. Zhang, D.-H. Hong and M.-T. Lim: De-

velopment of 3d camera-based robust bolt-hole detection system for bolting cabin, *Automation in Construction*, **44** (2014) 1.

- 11) S. Wu, J. Cao, Q. Ma and X. Chen: Hole position detection technology of thin-walled parts based on binocular vision, *Proceedings of the 2021 6th International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS)*, **6** (2021) 139.
- 12) N. Otsu: A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **9**, 1 (1979) 62.
- 13) S. Suzuki and K. Abe: Topological structural analysis of digitized binary images by border following, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, **30**, 1 (1985) 32.