

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

○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 †

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

†: 東京大学大学院工学系研究科

{hayamizu, igaue, ikura, higuchi, louhi, yamashita, asama}@robot.t.u-tokyo.ac.jp

‡: 株式会社大林組

{ito.s, taniguchi.nobuhiro, morino.hiroyuki, yoshida.kenichi.ro}@obayashi.co.jp

<要約>ロックボルトを挿入する長尺の孔の位置および角度を、カメラ画像のみを用いて推定する手法を提案する。カメラ画像上で輝度情報に基づき孔を楕円として検出し、検出した楕円の径および輝度情報から、孔の位置および角度を推定する。実験により本手法の有用性を確認した。

<キーワード>画像処理, 孔検出, 位置推定, 角度推定

1 序論

山岳トンネルの施工方法として最もよく用いられる工法は、New Austrian Tunneling Method (NATM 工法) である [1, 2]。この工法では、発破したトンネルに、吹き付けコンクリートと呼ばれるスプレー状のコンクリートを吹き付け、その上からロックボルトを打設することで、地山と吹き付けコンクリートを一体化させ、地山の保持力によってトンネル強度を高める。このうちロックボルト打設は、吹き付けコンクリートおよび地山に削孔した孔にモルタルを充填し、モルタルが詰まった孔にロックボルトを挿入する作業である。

ロックボルトの挿入は、凹凸のある壁面から孔を発見する作業、ロックボルト先端を孔位置に合わせる作業、ロックボルト全体を挿入する作業に分かれている。現在これらの作業は図1のように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細長い孔に重いロックボルトを挿入する必要があるため苦渋労働となり、機械化および自動化が望まれている。



図1 ロックボルト打設の様子

近年、ロックボルト打設の一連の流れである、ロックボルト孔の削孔、モルタル注入、ロックボルト打設を同一のアームを用いて機械化する手法が研究開発されている [3-5]。これらの手法では、全行程を通してアームの姿勢を保持するため、削孔時の情報からロックボルト孔の座標および角度が特定でき、ロックボルト孔の3次元座標や角度を計測することなく施工を機械化している。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独立した機械を用いて自動化する手法も提案されている [6–8]。この手法では、複数の削孔用削岩機を用いて削孔を行うと同時にロックボルト打設を行うため、1 本目の打設が完了してから次の孔に移動して打設を行う既存の手法に比べ、施工を効率化することが可能である。しかし、削孔と打設を別の機械で行う際は、削孔後に機械が場所を入れ替わって打設を行うため、孔の座標情報が失われる。孔の座標情報を用いずにロックボルト先端と孔の位置合わせを行うことは困難であるため、現在は作業員の目視により位置合わせが行われている。

孔検出後に位置合わせが必要とされる問題設定として、ビジュアルサーボが挙げられる。Mo らはデブスカメラを用いて撮影した画像から孔の輪郭を検出することにより、孔の位置を計測し、位置を合わせる手法を提案した [9]。ビジュアルサーボを用いて位置合わせを行う際は、孔の検出と位置計測を同時に実現する必要がある。孔の検出と位置計測を同時に行う方法として、ToF カメラ [10]、ステレオ法 [10,11]、光切断法 [12] などの方法が挙げられる。本研究では、現場への導入が容易である単眼カメラを使用した計測を行う。

ロックボルト孔付近は湧水やモルタルの影響でセンサの取り付けが難しいため、5～10 m 遠方からの計測が求められる。また、標準的な直径約 50 mm のロックボルト孔に、広く用いられている直径約 30 mm のロックボルトを打設する場合、±20 mm 程度の精度での計測が要求される。

以上から、本論文ではロックボルト打設専用機によるロックボルト打設作業の機械化の第一歩として、単眼カメラのみを用いてトンネル壁面にある削孔済みのロックボルト孔を検出し、位置および角度を遠方から計測することを目的とする。

2 提案手法

本研究においてロックボルト打設は、カメラ座標系内でロックボルト先端を、検出した孔中心の画像座標 (u_c, v_c) と一致させること、および、ロックボルトの中心軸を孔の中心軸と一致させることにより実現できると考える。よって、カメラ座標系における孔中心の画像座標 (u_c, v_c) および、孔の中心軸を計測することが求められる。

また、ロックボルト孔の孔径は、削孔時に使用するロッドの径に依存すると考えられるため、既知として扱うことができる。

これらの前提のもと、画像内から孔検出を行い、検出した孔径と既知の孔径を用いて孔の位置および角度を推定する手法を以下に述べる。

2.1 カメラ画像内の孔検出

削孔した孔の直径は、削孔に用いるロッドの径に依存することから既知とし、削孔した孔は壁面に垂直であり、壁面上では真円に見えたとする。また、撮影した画像内には孔が 1 つのみ含まれているとする。

画像内の孔を特定する手順を以下に示す。始めに、大津によるしきい値選定法 [13] を用いて 2 値化画像を作成する。次に、2 値化画像に対し、鈴木らによる輪郭検出 [14] を行う。検出したすべての輪郭に対して楕円フィッティングを行い、最後に楕円の中から 1 つを孔として決定する。

楕円フィッティングは次の手順で行う。楕円の式の係数を a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 と置くとき、最小 2 乗法より、式 (1) のように $\mathbf{a} = [a_1, a_2, a_3, a_4, a_5]^T$ について最小化する。

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

ここで、 N_j は j 番目の輪郭を構成する点の総数とする。

画像処理によって得られた $a_1 \sim a_5$ を用いて、求める楕円の中心点 (u_c, v_c) は式 (2)、式 (3)、長軸の u 軸からの角度 θ は式 (4) と表される。

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

$$v_c = \frac{a_1 a_3 - 2 a_4}{4 a_2 - a_1^2}, \quad (3)$$

$$\theta = \frac{\arctan\left(\frac{a_1}{1 - a_2}\right)}{2}. \quad (4)$$

また、孔の決定は、孔内が画像内で暗く見えることを利用して行う。まず検出したすべての楕円について、それぞれの楕円内の輝度の平均値を算出する。次に、算出した輝度の平均値が最も低い楕円を孔として採用する。

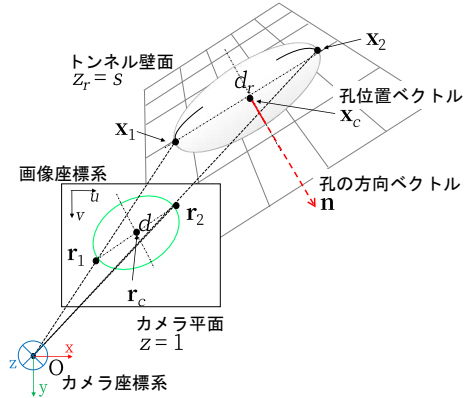


図 2 座標系および各ベクトルの定義

2.2 既知の孔径を使用した位置推定

座標系および各ベクトルの定義を図 2 に示す。図のように、画像座標系 (u, v) 、カメラ座標系 (x, y, z) とする。また、楕円の長軸の端点で、 $z = s$ 平面上にある点を $\mathbf{x}_1$, $\mathbf{x}_2$, $z = 1$ 平面上にある点を $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$ とし、楕円の中心点をそれぞれ、 $\mathbf{x}_c$, $\mathbf{r}_c$ とおく。このうち、 $\mathbf{x}_c$ を孔位置ベクトルとし、孔の中心軸と同軸で、孔の奥行方向のベクトル $\mathbf{n}$ を孔の方向ベクトルとする。

孔の直径 d_r は既知であるため、画像内の孔の直径と実際の孔の直径の関係から、カメラと孔との孔位置ベクトル $\mathbf{x}_c$ を求める。ここで、図 2 のように 2 つの楕円は相似であるから、式 (5)、式 (6)、式 (7) の関係が成り立つ。

$$\mathbf{x}_1 = s\mathbf{r}_1, \quad (5)$$

$$\mathbf{x}_2 = s\mathbf{r}_2, \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_c = s\mathbf{r}_c. \quad (7)$$

また、相似関係より、 $z_r = s$ は式 (8) で求められる。

$$s = \frac{d_r}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}. \quad (8)$$

よって、式 (7) に式 (8) を代入することで、孔位置ベクトル $\mathbf{x}_c$ を算出できる。

2.3 孔の角度推定

削孔した孔が壁面に垂直で壁面上で真円であるとき、孔の形状は見る位置によって異なる楕円形状になる。このことを用いて、孔の角度を推定する手法を提案する。

カメラから見た短軸と、実際の孔の直径の関係を図 3 に示す。このように、長軸を軸として楕円を回転させたとき、円になる角度を ϕ ($-90 \text{ deg} \leq \phi \leq 90 \text{ deg}$)

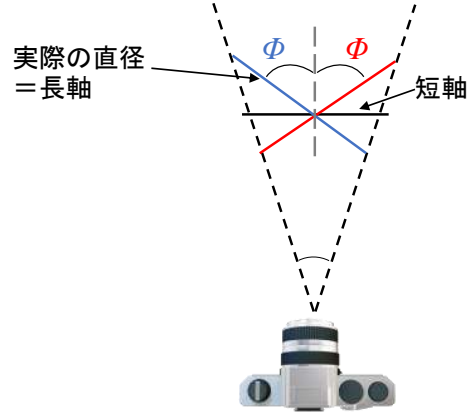


図 3 カメラから見た短軸と、実際の孔径の関係

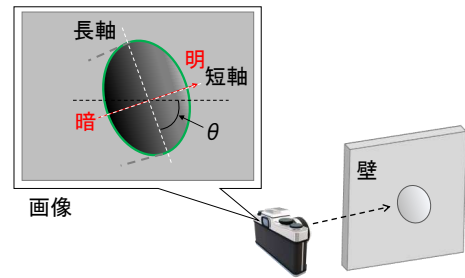


図 4 画像中の孔内のグラデーション

とする。また、楕円長軸の u 軸からの角度を θ ($0 \text{ deg} \leq \theta \leq 180 \text{ deg}$) とすると、孔の方向ベクトル $\mathbf{n}$ は式 (9) のように求めることができる。

$$\mathbf{n} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix}, \phi \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{R}$ はロドリゲスの公式を用いて法線と角度から算出した回転行列である。また、角度 ϕ は楕円の長軸の長さ l 、短軸の長さ s を用いて式 (10) のように求められる。

$$\phi = \arccos \left(\frac{s}{l} \right). \quad (10)$$

ここで、角度 ϕ は回転方向によって正負の 2 通り考えられるため、角度推定のために一意に定める必要がある。壁面に開いた孔を斜めから見た様子を図 4 に示す。図のように孔を斜めから見た場合、孔は長軸の長さが孔の直径である楕円となる。このとき、短軸の片側は孔内の壁が孔外の壁と連続していることから明るく見えるのに対し、反対側は孔内に光が届かず暗く見えるため、グラデーションが生じる。よって、短軸上

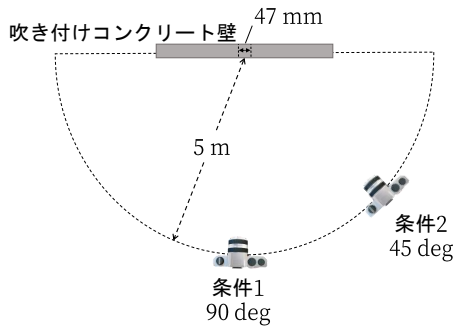


図5 撮影位置（上面図）

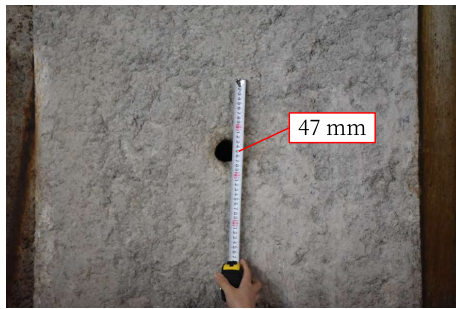


図6 計測した孔

のグラデーションのうち、暗い方に孔の方向ベクトル $\mathbf{n}$ が向いていると考えることにより、以下のように角度 ϕ を一意に定めることができる。

まず、楕円の短軸上の画素の輝度を取得し、最小二乗法により1次の近似式を得る。近似した直線の傾きが正である場合には ϕ は正であり、直線の傾きが負である場合には ϕ は負である。

3 実験

3.1 実験条件

提案手法の有効性を検証するため、施工中のトンネルにて実験を行った。各条件時のカメラと孔の位置関係を図5に、計測した孔を図6に示す。図5に示すように、壁面上の直径47 mmの孔に対し、90 deg, 45 degの位置から撮影を行った。また、2章で述べた前提に基づき、ロックボルト孔は必ず画角内に収まる条件で実験を行った。使用したカメラは、Nikon D750であり、レンズはAF-S NIKKOR 70-200 mmを装着した。また、撮影時の焦点距離は約200 mmとし、取得する画像の画素数は1920×1080とした。

実験結果の真値を得るため、各条件において図7のように、孔の中心にチェッカーボードの原点を合わせて複数回撮影した。撮影結果からチェッカーボードの位



図7 チェッカーボード撮影の様子

置と方向を推定し、それぞれの画像から算出した孔位置ベクトルおよび孔の方向ベクトルを平均して真値とした。

3.2 実験結果

2.1節で示した手法を用いて孔検出を行った様子のうち、90 degから撮影した条件1で得た画像に楕円フィッティングを行った様子を図8(a)に、孔検出を行った様子を図8(b)に示す。また、45 degから撮影した条件2で得た画像に楕円フィッティングを行った様子を図8(c)に、孔検出を行った様子を図8(d)に示す。取得した画像に対し、エッジ検出を行い、楕円フィッティングを行ったうえで、楕円内の輝度の平均が最も暗い楕円を孔として検出した。すべての条件において、正しい孔を検出できることが確認できた。

孔として検出した楕円の短軸上の輝度の例として、条件2において検出した楕円を回転させ、 u 軸と短軸を一致させた際の短軸上の輝度、およびその1次近似を図9に示す。図より、孔として検出した楕円の短軸上において、輝度のグラデーションが生じていることがわかる。また、輝度に対して最小二乗法を用いて1次近似した直線の傾きから、図9に示した条件2の角度 ϕ が負であると推定できた。

孔検出結果を用いて推定した孔位置ベクトル $\mathbf{x}_c$ の x 成分、 y 成分、 z 成分と、チェッカーボード画像から算出した孔位置ベクトル $\mathbf{x}_c$ の各成分の誤差の平均値を表1に示す。ここから、孔検出結果を用いて推定した孔位置ベクトルのうち、 x 成分の誤差は ± 20 mm に収まっている一方、 y 成分の誤差は目標より大きいことがわかる。これは、孔検出を行った際に、孔口の加工形状が理想的でなかったことから輪郭が大きく検出されたことに起因すると考えられる。また、 z 成分の誤差は、輪郭検出結果に大きく依存することから大きくなったと考えられる。

また、孔検出結果を用いて推定した孔の方向ベクト

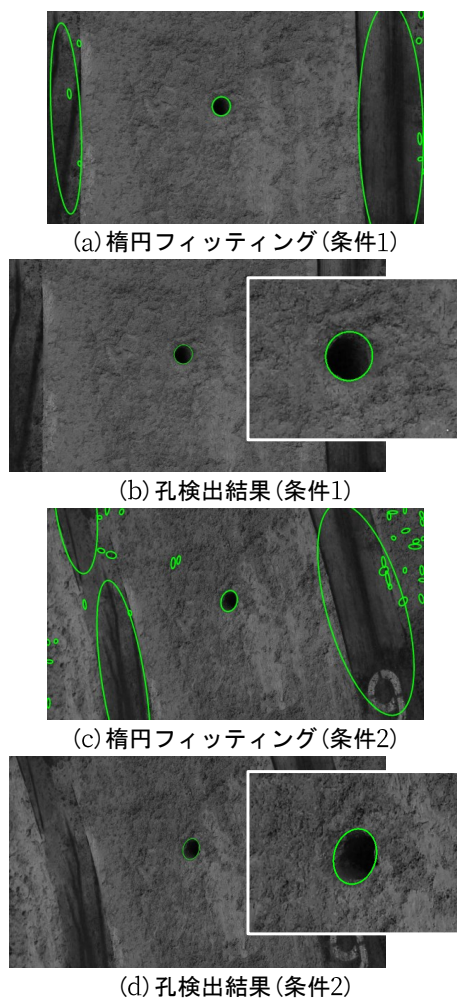


図 8 画像処理結果

ルとチェッカーボード画像から算出した孔の方向ベクトルのなす角の平均値を表 2 に示す。計測した孔は壁面に対して垂直ではなく、壁面上の孔の形状が真円ではなかったことから、孔の方向ベクトルの推定値と真値の間にも誤差が生じた。しかし、提案手法を用いることにより角度 ϕ の正負を正しく推定することができた。

以上の結果のように、孔位置ベクトルの各成分および孔の方向ベクトルに目標値以上の誤差は生じたものの、孔の方向を特定することには成功し、本手法を用いたロックボルト先端とロックボルト孔の位置合わせの実現可能性を示すことができた。

4 結論

本論文では、遠方から単眼カメラのみを用いてロックボルト孔を検出し、位置および角度を計測することを目的として、画像内のロックボルト孔を検出して位置および角度を推定する手法を提案した。また、実験

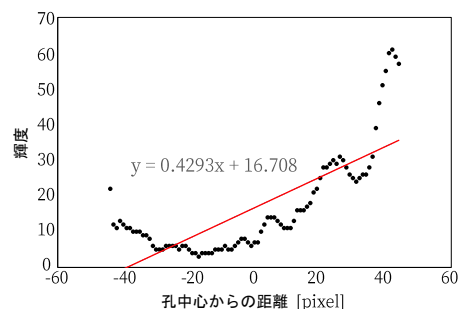


図 9 短軸上の輝度の例 (条件 2)

表 1 孔位置ベクトル x_c の誤差平均

	x 成分誤差 [mm]	y 成分誤差 [mm]	z 成分誤差 [mm]
条件 1 (90 deg)	3.9	27.4	693.1
条件 2 (45 deg)	7.5	38.4	1263.5

により手法を検証し、手法の実現可能性を示した。

今後は、孔検出のアルゴリズムを改善することにより計測精度の向上を目指すほか、本手法をビジュアルサーボと組み合わせることにより、ロックボルト先端と孔の位置合わせの実現を目指す。

参考文献

- [1] S. Tomita, T. Kobayashi, T. Ushiromura, Y. Takiuchi, and M. Niizeki, "Construction of natm tunnel crossing right under existing railway tunnel," *Proceedings of Tunnel Engineering, JSCE*, vol. 6, pp. 235–240, 1996.
- [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] 鹿島建設株式会社, "ドリルジャンボを用いたロックボルト工の機械化施工を実現!～北海道開発局大狩部トンネルでその効果を実証～," <https://www.kajima.co.jp/news/press/201907/17c1-j.htm>, 2021/12/4 閲覧.
- [4] 株式会社フジタ, "「ロックボルト」を搭載した国内初の多機能機械を共同開発～ロックボルト打設と発破用の穿孔作業を同時施工で効

表 2 孔の方向ベクトル $\mathbf{n}$ の誤差平均

	誤差 [deg]
条件 1 (90 deg)	17.7
条件 2 (45 deg)	15.7

率化～,” https://www.fujita.co.jp/information/2020/post_421.html, 2021/12/4 閲覧.

- [5] 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, pp. VI-679, 2021.
- [6] 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, pp. VI-904, 2021.
- [7] 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, pp. VI-905, 2021.
- [8] 金井俊二, 大西吉実, 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.
- [9] Y.-H. Mo, T.-K. Kang, H.-Z. Zhang, D.-H. Hong, and M.-T. Lim, “Development of 3d camera-based robust bolt-hole detection system for bolt-ing cabin,” *Automation in Construction*, vol. 44, pp. 1–11, 2014.
- [10] S. Hussmann, T. Ringbeck, and B. Hagebeuker, “A performance review of 3d tof vision systems in comparison to stereo vision systems,” *Stereo vision*, vol. 372, 2008.
- [11] S. Malassiotis and M. G. Strintzis, “Stereo vision system for precision dimensional inspection of 3d holes,” *Machine Vision and Applications*, vol. 15, no. 2, pp. 101–113, 2003.
- [12] R. Sato, K. Kato, and K. Harada, “Development of the hole position inspection system of pressed car parts by using laser 3-d measurement,” *Proceedings of the 19th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision*, pp. 317–322, 2013.
- [13] N. Otsu, “A threshold selection method from gray-level histograms,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66, 1979.
- [14] S. Suzuki and K. Abe, “Topological structural analysis of digitized binary images by border following,” *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 30, no. 1, pp. 32–46, 1985.