

テクスチャレス環境の3次元計測のための 奥行情報を考慮したスペckル移動推定

樋口 寛 (東京大学), 藤井 浩光 (千葉工業大学), 谷口 敦史 (日立製作所),
渡辺 正浩 (日立製作所), 山下 淳 (東京大学), 浅間 一 (東京大学)

Speckle Based Pose Estimation Considering Depth Information for 3D Measurement of Textureless Environment

Hiroshi Higuchi (The University of Tokyo), Hiromitsu Fujii (Chiba Institute of Technology),
Atsushi Taniguchi (Hitachi, Ltd.), Masahiro Watanabe (Hitachi, Ltd.),
Atsushi Yamashita (The University of Tokyo), and Hajime Asama (The University of Tokyo)

Abstract : In this paper, we develop a 3D measurement system for textureless structure by light-section method and visual odometry. We use speckle patterns to estimate the pose changes from the images of the texture-less target surface, which has poor features. Proposed method can strictly estimate the pose of measurement equipment from speckle information by considering depth information obtained by light-section method.

1. 序論

現在, 3次元計測の技術は様々な分野で重要性が高まっている。特に, レーザ計測技術は非接触で高精度な3次元計測が可能な手法として, 工業製品の製造や点検を目的として実用化が進んでいる。

レーザ計測は高精度な計測が可能であるが, 計測範囲が計測器から観測可能な範囲に制限されるため, 大型構造物や障害物の存在する環境の全体形状を一度に計測することはできない。そのため, 複数の地点で計測したデータの位置・姿勢関係を計算し, 座標変換により統合することで全体形状を復元する計測手法が用いられる。

レーザ計測結果の統合手法として, Iterative Closest Point (ICP) が一般的に利用される [1]。ICP は2つの点群の最近傍点間の距離の総和を最小化することにより, 3次元形状の共通部分が重なるように計測結果を統合することが可能である。しかし, 3次元特徴量の乏しい平坦な構造に対しては適用が困難である。

そこで, レーザ計測の結果を画像情報に基づき統合する手法が提案されている [2][3]。これらの研究では, カメラとラインレーザを組み合わせた計測システムが提案されている。光切断法により高精度に計測した断面形状を, 画像情報に基づく位置・姿勢推定により統合することで広範囲の計測を実現している。この手法では, 表面形状やテクスチャにより発生する画像中の輝度値の分布を特徴量として位置・姿勢変化を推定するため, 平坦な環境に対しても適用が可能である。

しかし, 工業製品には表面が滑らかでテクスチャが存在

しない構造物が多く存在する。そのため, テクスチャレスの構造物に対するレーザ計測結果の統合手法の開発は重要である。

本研究ではスペckルを利用した位置・姿勢推定によりこの問題を解決する。スペckルはレーザなどのコヒーレントな光を粗面に照射した際に発生する干渉模様である。照射面の表面粗さが光源の波長以上であれば高コントラストなパターンが発生することが知られている [4]。

レーザと照射対象の相対位置が微小に変化する際には画像間に高い相関が存在することを利用して, 計測物の運動をスペckルにより推定する研究が過去に行われている [5][6]。[5] はスペckルを利用したエンコーダにより, スリッパに頑健な移動ロボットの移動推定を実現している。しかし, この手法は平面に対して2次元の移動量を求めることを目的としており, 計測物の形状に依存せずに回転と並進を含む6自由度の位置・姿勢変化を推定することができない。一方で, [6] ではカメラとレーザ光源のみを利用して, スペckルに基づく6自由度の位置・姿勢を推定するシステムが提案されている。この研究では, スペckル生成のためのレーザ光源とカメラを搭載した計測器を環境中で移動させることにより, 計測器の位置・姿勢を推定するシステムが提案されている。

[6] をレーザ計測結果の統合に利用する場合の課題として, 計測物表面が合焦点から大きく外れた位置に存在することを前提としている点が挙げられる。本研究で対象とするレーザ計測においては, 計測対象表面のレーザ光を鮮明に撮影する必要があるため, 以上の前提を利用することができない。そこで, 本研究では近似が成立しない条件にお

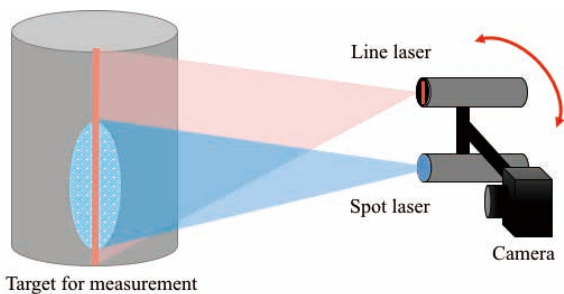


Fig. 1: 3D measurement system for textureless environment

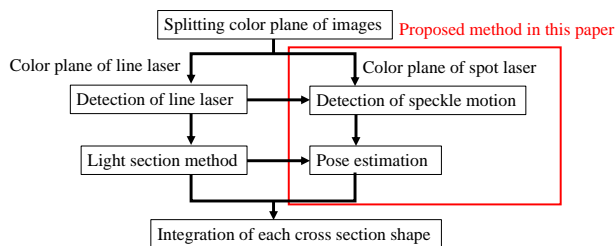


Fig. 2: Flow of proposed 3D measurement process

いても高精度に移動量を推定することが可能な3次元計測システムを構築する。

2. 提案手法

2.1 3次元計測システムの概要

本研究で提案する3次元計測システムの概要を Fig. 1 に示す。計測装置にはスリット状のレーザー光を照射するラインレーザ、拡がりのある円形状の領域を照射可能なスポットレーザ、及びカメラを搭載する。この計測装置を環境中で移動させながら取得した画像を利用して、計測物の形状を計測する。ラインレーザは光切断法の計測領域を照射するパターンを、スポットレーザはスペックルパターンを生成するためにそれぞれ利用する。

ラインレーザによる光切断法とスペックルに基づく移動推定では、いずれも1台のカメラで取得した画像から、2種類のレーザー情報を分離する必要がある。よって、カメラ画像の平面的分割により情報を分離するために、レーザー光にはカメラに内蔵される原色フィルタにより異なるプレーンに分割可能な波長を使用する。

3次元計測の流れを Fig. 2 に示す。処理は大きく、光切断法によるラインレーザ照射領域の断面形状計測と、スペックルパターンに基づくカメラの位置・姿勢推定の処理に分かれる。

まず、取得画像をカラープレーンに分割することにより、光切断法に使用するラインレーザ光を含む画像（ライン画

像）と、位置・姿勢推定に利用するスポットレーザ光を含む画像（スポット画像）に分解する。その後、ライン画像から輝度値の高い画素を抽出して、画像中のラインレーザの照射位置を検出する。次に、三角測量の原理によりラインレーザの2次元座標を3次元座標に変換し、ラインレーザの空間中における3次元形状を計算する。

続いて、装置の位置・姿勢推定処理を行う。位置・姿勢推定処理は、画像中のスペックルの移動を検出する処理と、スペックル移動量から装置の位置・姿勢を推定する処理に分かれる。スペックル移動検出は、スポット光の輪郭や、ラインレーザのスリットパターンなどの、移動検出の妨げとなる情報を取り除き、スペックルの移動のみに着目して高精度な移動検出が可能な手法を提案する。位置・姿勢推定処理では、スペックルの発生原理に基づいて、スペックルの移動とカメラの運動の関係をモデル化し、さらに、光切断法により得られた奥行情報を利用することで、従来に比べて厳密に位置・姿勢変化を推定する。

2.2 スペックル移動の検出

本節では、スペックルの画像中における移動を検出する手法について述べる。計測装置の移動に伴い撮影されるスペックルも変化する。スペックルの移動は、画像中のある領域のスペックルパターンと相関が最大となる領域を他のフレームから探索することにより検出することが可能である。

ここで、スペックルの移動推定にはスペックルパターンのみに着目して相関を評価する必要があるが、スペックル領域の輪郭や、ラインレーザのラインがパターンとして認識されることによる精度の低下が問題となる。そこで、画像中のスペックルパターンが存在する領域のみを自動で検出する手法を提案する。

まず、ラインレーザの影響を取り除くマスクを生成する。これは光切断法に使用するラインレーザの検出結果を参照することにより行う。ラインレーザ領域に該当する領域を取り除くためのマスクを生成する。次に、スペックルの領域外のパターンを取り除くためのマスクを生成する。スペックルが高い空間周波数をもつパターンであることに着目し、画像全体にラプラシアンフィルタを適用する。この処理により出力される画像では高い値を持つ画素がスペックル領域内では密に、スペックル領域外では疎に分布する。したがって、フィルタリングの出力画像に対してクロージングを行うことで、スペックル領域のみを抽出するためのマスクを生成することができる。

上記の2つのマスクの論理積により得られる画像をマスクとし、マスク領域に該当する画素のみを評価対象としてブロックマッチングを行うことにより、スペックルの相関

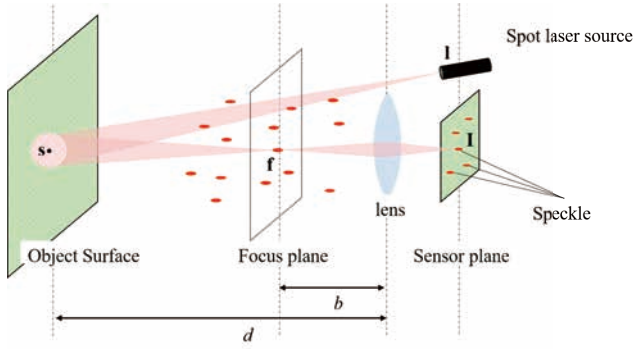


Fig. 3: Relation between speckle and measurement system

のみに着目した移動検出が可能となる。ブロックマッチングの類似度評価関数には [7] において提案した、マスク領域を考慮した正規化相互相関を利用する。

2.3 スペックルによる位置・姿勢推定手法

本節では、スペックル移動からカメラの位置・姿勢を推定する手法について説明する。

まずスペックルが観測される原理について説明する。カメラ、レーザ、及び照射面が Fig. 3 に示す位置関係にある場合を考える。スポットレーザから照射されたレーザ光は物体面上で反射した後、空間中に散乱する。レーザ光はコヒーレントであるため、多数の散乱光は互いに干渉し、空間中に干渉模様を生成する。ここで、カメラの画素 $\mathbf{I} = [u, v]$ に到達する任意の光線は、カメラの合焦面上の次の点 \mathbf{f} を通過する。

$$\mathbf{f} = b\mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{A} はカメラの内部パラメータ行列、 b はカメラ原点から合焦面までの距離である。点 \mathbf{f} からレンズを通過して \mathbf{I} に到達する光線の光路長はすべて等しい。したがって、画素 \mathbf{I} では点 \mathbf{f} における干渉模様の輝度値に比例した値が観測される。

次に、計測器が回転 \mathbf{R} 、並進 \mathbf{t} の運動をした場合のスペックル移動を考える。提案システムにおいてはカメラとスポットレーザ光源の位置関係は固定されているため同時に移動する。計測器の移動に対する観測されるスペックルの移動を、スポットレーザ光源の移動による寄与、カメラの移動による寄与の順に考える。

まず、スポットレーザ光源の移動について考える。空間中で反射光の干渉により発生する電場の強度分布は、レーザ光源の移動により、移動前の点 \mathbf{f} における強度と移動後の対応する点 \mathbf{f}' が以下の関係を満たすように変化する [6]。

$$\frac{\mathbf{f} - \mathbf{s}}{|\mathbf{f} - \mathbf{s}|} - \frac{\mathbf{f}' - \mathbf{s}}{|\mathbf{f}' - \mathbf{s}|} + \frac{\mathbf{l} - \mathbf{s}}{|\mathbf{l} - \mathbf{s}|} - \frac{\mathbf{l}' - \mathbf{s}}{|\mathbf{l}' - \mathbf{s}|} = \mathbf{0}, \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{s} は照射面のスポット中心の位置、 \mathbf{l} 、 \mathbf{l}' はそれぞれ移動前後のレーザ光源の位置である。

移動量が微小であることから、 $|\mathbf{f} - \mathbf{s}| \approx |\mathbf{f}' - \mathbf{s}|$ 、 $|\mathbf{l} - \mathbf{s}| \approx |\mathbf{l}' - \mathbf{s}|$ が成立する。さらに、レーザ光源をカメラ付近に設置しているため、 $\frac{|\mathbf{f} - \mathbf{s}|}{|\mathbf{l} - \mathbf{s}|} = \frac{d-b}{d}$ が成立する。したがって、式 (2) を変形することにより以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{f}' &= \mathbf{f} + \frac{d-b}{d}(\mathbf{l}' - \mathbf{l}) \\ &= \mathbf{f} + \frac{d-b}{d}\mathbf{t}, \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 d はカメラ原点から照射面までの距離を示す。

続いて、カメラの移動について考える。カメラが移動するとき、レーザと照射面の位置関係の変化が無視できる場合には、空間中における電場の強度分布は変化しない。よって、カメラ移動によるスペックルの移動は空間中の固定点を観測する場合と同様に振る舞う。以上より、移動前の画素 \mathbf{I} に対応する移動後の画素 $\mathbf{I}' = [u', v']$ は以下の式により得られる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} &\sim \mathbf{A}(\mathbf{R}\mathbf{f}' + \mathbf{t}) \\ &= \mathbf{A} \left(\mathbf{R} \left(b\mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{d-b}{d}\mathbf{t} \right) + \mathbf{t} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 \sim は同次座標系における同値を示す。

よって、2.2 節において、求めたスペックルの移動と式 (4) により得られる移動量との誤差を最小化するように位置・姿勢を最適化することにより、スペックル移動から計測器の位置・姿勢を推定することができる。

式 (4) には、カメラのパラメータに加えて、物体面までの奥行 d が含まれている。奥行を未知とすると並進移動の大きさに 1 自由度の不定性があり、実スケールで移動を推定することができない。先行研究 [6] ではこの不定性を解消するための方法として、 $b \ll d$ が成立する条件で計測系を構築し、 $\frac{b}{d} \approx 0$ の近似により、奥行の情報 d を式から消去し、奥行が未知であっても実スケールの移動推定が可能手法が提案されている。第 1 章で述べた通り、本研究ではこの近似を成立させることができない。しかし、本研究ではレーザが照射されている点は光切断法により奥行情報が既知であるため、ラインレーザ照射点を対応点として選択することにより厳密に位置・姿勢を最適化することが可能である。

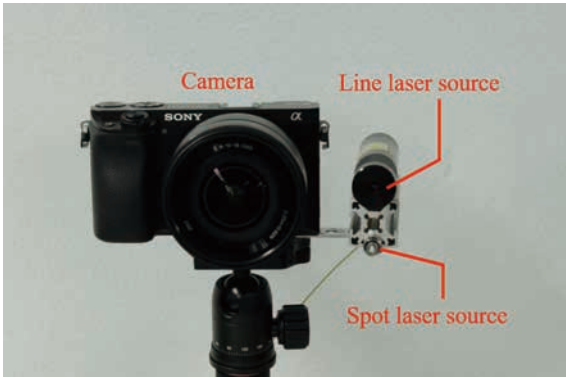


Fig. 4: Measurement equipment used for experiment

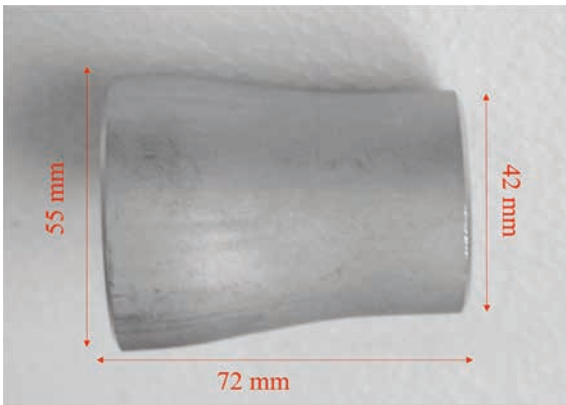


Fig. 5: Target of measurement

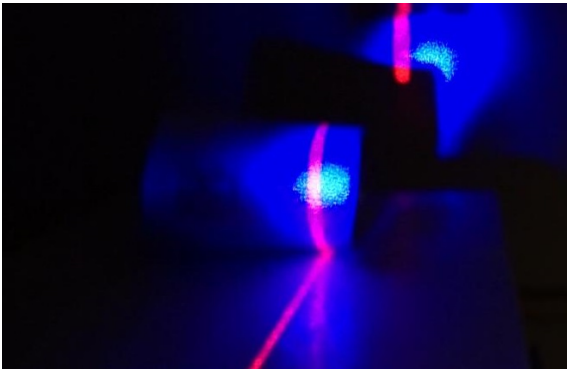


Fig. 6: Obtained image used for measurement

3. 3次元計測実験

3.1 実験環境

提案手法を検証するために3次元計測実験を行った。実験にはカメラ、ラインレーザ、及びスポットレーザを配置したFig. 4に示す計測装置を使用し、Fig. 5に示す鋼管の表面を3次元計測した。カメラにはSONY製デジタル一眼カメラα6000と焦点距離18 mm、F値4.0のレンズを使用し、式(4)における合焦点までの距離は $b = 94.0$ mmとした。ラインレーザとスポットレーザにはそれぞれ波長

650 nm、450 nmの半導体レーザを使用した。

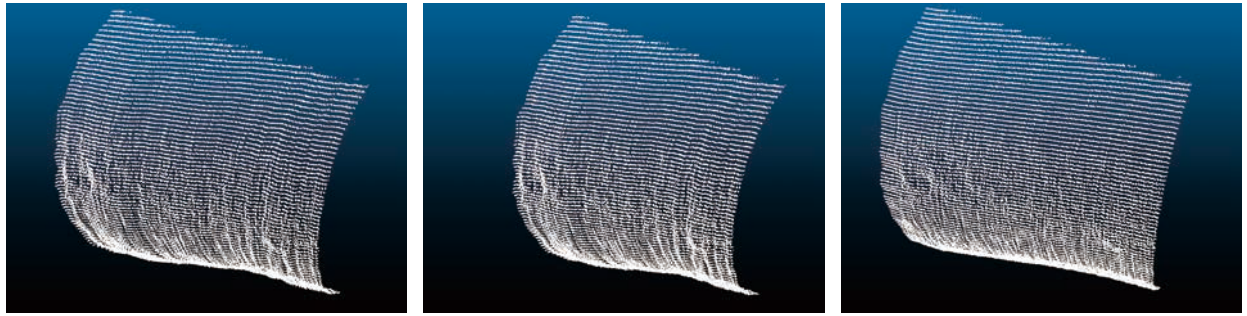
本実験では計測対象をカメラから約250 mm離れた位置に設置し、電動リニアガイドにより水平方向に50 mm並進移動させながら画像を取得した。取得画像の例をFig. 6に示す。取得画像から提案手法により鋼管の3次元形状を復元した。

3.2 3次元計測結果

実験により得られた3次元復元結果をFig. 7に示す。Fig. 7(a)、Fig. 7(b)、Fig. 7(c)は光切断法による計測結果をそれぞれ異なる方法で統合した結果である。Fig. 7(a)は提案手法により取得画像のみから位置・姿勢を推定した結果である。式(4)における奥行 d を求めるために、光切断法による計測結果を利用した。Fig. 7(b)は画像のみから位置・姿勢推定を行ったが、奥行情報を利用せずに式(4)において近似 $\frac{b}{d} \approx 0$ を適用した場合の結果である。Fig. 7(c)は事前に与えられた移動情報を利用して統合した結果であり、位置・姿勢推定を行った結果と比較するための真値である。これらの結果から、近似を使用した場合には真値と比べて推定移動量が小さくなったために縮んだ形状が得られているのに対して、提案手法では真値に近い形状が得られていることが確認できる。

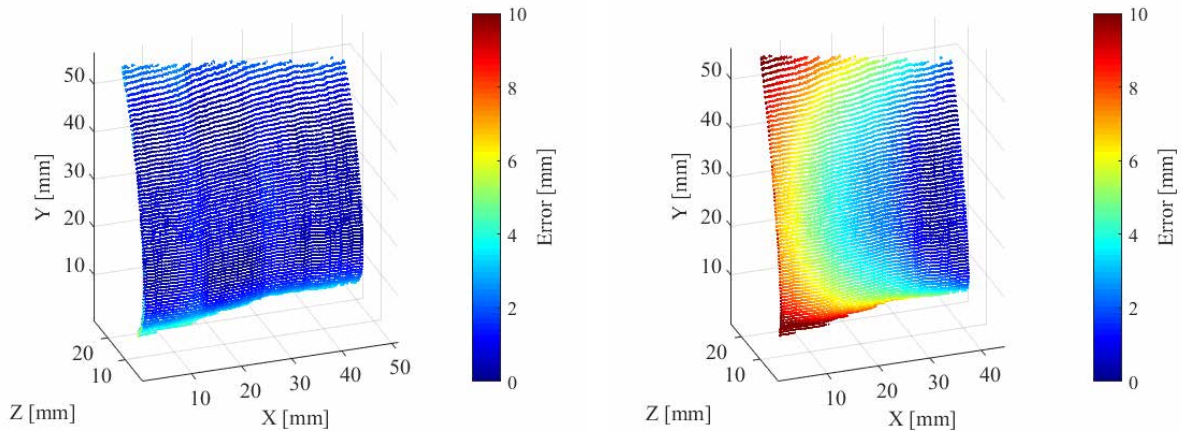
次に、Fig. 7(a)、Fig. 7(b)に示した結果の定量評価を行った。まず、復元結果の真値(Fig. 7(c))に対する各結果の点群間のユークリッド距離を誤差として形状の評価を行った。真値からの誤差をヒートマップにより可視化した結果をFig. 8に示す。誤差の平均値はFig. 8(a)では1.1 mm、Fig. 8(b)では4.5 mmであった。さらに、提案手法の移動推定精度を定量的に評価するために、Fig. 7の各結果について初期フレームから最終フレームまでの並進移動量を比較した。結果をTable 1に示す。真値に対する移動量は、奥行情報を利用せずに近似を適用した場合は約73%、奥行情報まで考慮した提案手法では約90%となった。以上より、定量的にも提案手法により近似を利用した場合に比べて正確な3次元計測が可能であることを確認した。

次に、提案手法における誤差の原因について考える。誤差の原因としては、式(3)の導出において使用した近似 $|\mathbf{f} - \mathbf{s}| \approx |\mathbf{f}' - \mathbf{s}|$ の影響が考えられる。この近似は、計測器の移動量 $|\mathbf{t}|$ と点 \mathbf{f} から照射面までの奥行 $|d - b|$ の間に、 $|\mathbf{t}| \ll |d - b|$ が成立することを前提としている。しかし、本実験では光切断法を実行するために、合焦点を計測物表面に近づけた結果、近似による誤差が増大したと考えられる。したがって、計測精度を高めるためには式(2)から \mathbf{f}' を導出する過程で近似による誤差の影響を抑える必要がある。



(a) Estimating pose changes considering depth information (Proposed method) (b) Estimating pose changes without using depth information (Approximation) (c) Using given pose changes for integration (Ground truth)

Fig. 7: Results of 3D measurement



(a) Result considering depth information (Proposed method) (b) Result without using depth information (Approximation)

Fig. 8: Distributions of measurement error

Table 1: Accuracy evaluation of movement amount

	Amount of movement [mm]
(a) Approximation	36.5
(b) Proposed method	44.9
(c) Ground truth	50.0

4. 結論

本稿では、工業製品などに多く含まれる表面がテクスチャレスな計測物に対する3次元計測システムを構築した。レーザ計測結果を統合して全体形状を復元する際に必要となる位置・姿勢推定手法としてスペックルを利用した手法を提案した。従来の位置・姿勢推定のみを目的とした、スペックル運動推定の研究では利用できなかった奥行情報を利用することにより、従来に比べて近似を利用しないより厳密なモデルによる位置・姿勢推定が可能な3次元計測システムを構築した。

提案手法を検証するために実機実験を行い、実際にテクスチャレスな金属表面を提案手法により計測可能であることを確認し、有効性を示した。定量評価により、真値と比較して、形状は平均誤差 1.1 mm、移動量は全移動量の約 10%の誤差で計測ができていることを確認した。

今後の展望としては、スペックルの移動推定手法を改良することが挙げられる。光源の移動とスペックルの移動の関係を求める際に使用した近似が本実験の誤差の原因として考えられる。計測精度を高めるために、より高精度な近似や、近似を使用しない式変形により位置・姿勢推定が可能な手法を構築することが今後の課題である。

参考文献

- [1] C. Thomson, G. Apostolopoulos, D. Backes, and J. Boehm, “Mobile Laser Scanning for Indoor Modelling”, *ISPRS Annals of Photogrammetry*,

Remote Sensing and Spatial Information Sciences, No. 2, pp. 289–293, 2013.

- [2] A. Yamashita, K. Matsui, R. Kawanishi, T. Kaneko, T. Murakami, H. Omori, T. Nakamura, and H. Asama, “Self-Localization and 3-D Model Construction of Pipe by Earthworm Robot Equipped with Omni-Directional Rangefinder”, in *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (RO-BIO2011)*, pp. 1017–1023, 2011.
- [3] A. Duda, T. Kwasnitschka, J. Albiez, and F. Kirchner, “Self-Referenced Laser System for Optical 3D Seafloor Mapping”, in *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, pp. 1–6, 2016.
- [4] I. Yamaguchi, “Theory and Applications of Speckle Displacement and Decorrelation”, *Speckle Metrology*, edited by R.S. Sirohi, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 1–39, 1993.
- [5] I. Nagai, G. Yamauch, K. Nagatani, K. Watanabe, and K. Yoshida, “Positioning Device for Outdoor Mobile Robots Using Optical Sensors and Lasers”, *Advanced Robotics*, Vol. 27, No. 15, pp. 1147–1160, 2013.
- [6] K. Jo, M. Gupta, and S. K. Nayar, “SpeDo: 6 DOF Ego-Motion Sensor Using Speckle Defocus Imaging”, in *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 4319–4327, 2015.
- [7] 樋口寛, 藤井浩光, 谷口敦史, 渡辺正浩, 山下淳, 浅間一, “全周ラインレーザとカメラを用いた大型構造物内部の三次元計測”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 36, No. 3, pp. 222–232, 2018.