

全周レーザとカメラを用いた大型長尺物の 3 次元形状計測のための FFT によるテンプレートマッチングの高速化

川田 桃子¹, 樋口 寛¹, 藤井 浩光², 谷口 敦史³, 渡辺 正浩³, 山下 淳¹, 浅間 一¹

1: 東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻

2: 千葉工業大学 先進工学部 未来ロボティクス学科 3: 日立製作所

kawata@robot.t.u-tokyo.ac.jp

概要: 本研究では, 大型長尺物のための光切断法を用いた 3 次元形状計測を高速化する手法を提案する. 光切断法で得た各切断面の統合手法として環境中のテクスチャ情報を用いる手法がある. しかし, この手法では, 長い計算時間が課題である. そこで, 多くを占めている移動量推定のための対応点検出の計算時間短縮を目的とした. 対応点検出の際には, レーザ光の影響を防ぐために該当部分をマスクする必要があるため, マスクを考慮した FFT による高速なテンプレートマッチングを導入し高速化を図った. 実験によって, 従来手法に比べ全体の計算時間が 6%に短縮し, 提案手法が 3 次元形状計測の高速化に有効であることが分かった.

1. 序論

3 次元形状計測は, 製造業の分野において, 品質検査や保守点検を目的として, 重要な技術になっている [1]. 特に, 鉄道車両において, 組立検査の工程は現在人の手で行われており, 高精度の 3 次元形状計測の自動化が求められている [2].

3 次元形状計測法としては, カメラのみを使用する受動計測と, レーザなどを使用した能動計測がある. 前者の例としては, カメラのみを用いた Structure from Motion (SfM) が挙げられるが, 大型の構造物のおおよその形状は復元することができるものの, 精度良く計測することが難しい [3]. 後者については, 主に Time of Flight (ToF) 方式と三角測量に基づいた手法に分けることができる.

1 つ目の ToF 方式においては, Laser Range Finder (LRF) などを用いて, 光源からレーザを照射してから受光器にレーザが戻ってくるまでの時間を求め, 対象物までの距離を測定する. 各装置から照射されるレーザ点の数が決まっているため, 大型構造物を, この手法を用いて計測する場合などの, 照射対象物が遠くなる状況においては, 測定点群が疎になってしまう. そのため, 正確な 3

次元形状計測には適さない [4]. また, 大型構造物を撮影する際には, レーザ照射を複数の地点から行う必要がある. 複数の地点から照射した結果を統合することで, 大型構造物の 3 次元形状を得ることができる. この際に, しばしば使われるのが, Interactive Closest Point (ICP) である [5]. ICP では, 複数地点からのデータを統合する際に, 対象物体の凹凸構造が豊富であることが必要である. そのため, 鉄道車両などの大型長尺物の場合, このような内部の凹凸構造に乏しい場合が多く, 適用が難しい. その観点からも ToF 方式による大型構造物の高精度の 3 次元形状計測は難しい.

次に, 三角測量に基づく手法の 1 つとして, レーザによる光切断法を用いた測定方法が挙げられる [6]. この手法においては, 断面の 3 次元形状を正確に高精度に測定することができる. この手法では, 複数の視点からスリット状のレーザを照射した撮影を行い, 得られた断面形状を, エンコーダなどを用いて機械的に計測し統合するか, または回転移動量を推定し, 結果を統合する必要がある. それらの統合方法の 1 つとして, レーザ光を照射した後に, 環境中のテクスチャ情報を用いた手法が提案されている [6][7][8]. 特に, [6]においては, 3 次元形状を取得するのに必要なレー

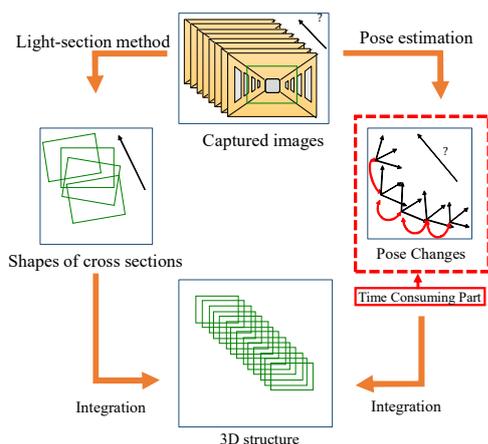


図1 光切断法による3次元形状計測の流れ

ザ情報と、統合に必要なテクスチャ情報を、同時に同一の画像から取得することができる手法が提案されている。しかし、テンプレートマッチングの計算時間が長く、全体の計算時間の9割を占めているという課題がある。そこで、本研究においては、光切断法による3次元形状計測の高速化の手法を提案する。特に、対応点検出の高速化に注目し、レーザの影響を排除するためのマスクを考慮することができるFast Fourier Transform (FFT)を用いた類似度計算を用いてアプローチを行う。

また、[6][9]では、直進移動の場合の3次元形状復元についての検証が行われており、[9]が従来手法[6]の高速化に有効であることが確認されている。そこで、本研究では、回転運動を含めた移動を行い、画像取得をすることで、回転運動における3次元形状復元についても有効性の検証を行う。

2. 光切断法を用いた3次元形状計測の概要

本章では、提案手法の概要について説明をする。図1にあるように、全体の手順は大きく分けて2つの部分に分けられる。まず、レーザ照射された対象物を含んだ画像を、異なる地点から撮影する。この画像より、三角測量の原理によって切断面の3次元形状を取得できる。これは2.1節にて説明をする。次に各撮影地点における位置・姿勢を推定する。各画像間で、レーザ光の周りにおいて、ブロックマッチングを用いて対応点検出を行う。評価式としてZNCC (Zero-means Normalized Cross-Correlation)を用いる。そして、その対応点から各画像間の位置・姿勢推定を得ることができる。最後に異なる地点からの切断面の3次元形状を推定された位置・姿勢の移動量を用いて統合し、全体

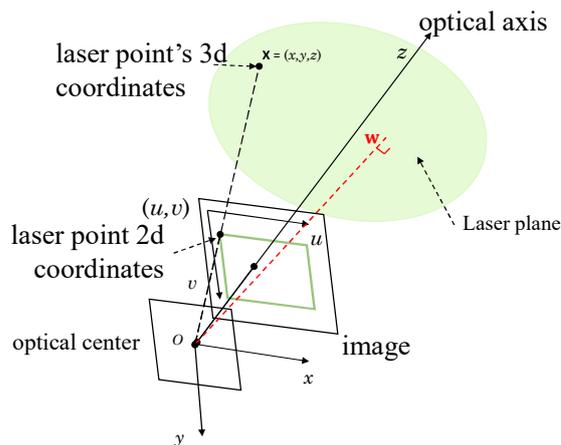


図2 カメラ座標系と画像上の点の3次元座標の関係

の3次元形状を得る。

2.1. 断面形状の取得

断面形状を計測するためには、まず画像上で照射されているレーザの位置を取得する必要がある。画像中心を原点とする極座標を考え、偏角を固定し半径方向に一定間隔で走査し、偏角ごとに最大輝度となるレーザの座標を求める。この最大輝度のレーザ点のことをレーザ投光点と呼ぶ。

次に、レーザ投光点の3次元座標を取得する手法の概要について説明する。画像上のレーザ投光点の2次元座標を、カメラの内部パラメータ A を用いて、3次元座標を求める。 A はカメラキャリブレーションによって求められるパラメータであり、カメラの焦点距離 (f_x, f_y) と画像中心 (c_x, c_y) を用いて式(1)のように表現される。図2は各パラメータの関係性を図示する。

$$A = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

画像座標 (u, v) の光線ベクトル \mathbf{r} を以下のように定義する。

$$\mathbf{r} \equiv A^{-1} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

画像座標 (u, v) のカメラ座標系における3次元座標 $\mathbf{X} = (x, y, z)$ は、相似の関係を用いると光線ベクトル \mathbf{r} の定数倍になるので、定数 a を用いて以下のように表せる。

$$\mathbf{X} = a\mathbf{r} \quad (3)$$

式(3)より、画像の2次元の点の3次元座標を求めるには、変数 a を決定すればよい。

全周ラインレーザにおいて、各レーザ投光点は常にレーザ照射光で作られる平面 (Laser plane) にある。よって、カメラの座標系の中心 (\mathbf{O}) からこ

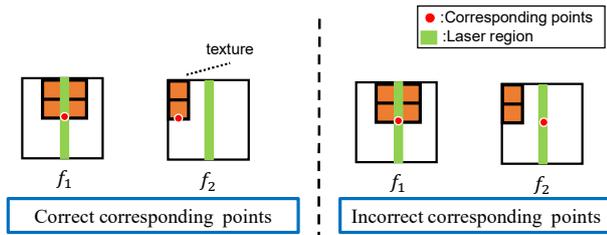


図3 誤検出の例

の平面上に下した垂線の足の、光学中心における位置ベクトル w を用いると、レーザ平面上に存在する任意の直線は、レーザ平面の垂直ベクトルと直交することを利用して、

$$w^T(X - w) = 0 \quad (4)$$

と表すことができ、式(4)を X について解くことで、各レーザ投光点のカメラ座標系における3次元座標を求めることができる。

2.2. 画像間の位置・移動量推定

本節では各画像間でのカメラの並進・回転量推定を行うために用いた SfM の手法の概要について説明する。SfM は複数台の位置・姿勢の異なるフレーム間で、同一となる対応点を検出し、幾何学的な拘束条件に基づいてカメラの並進・回転量と対応点の3次元座標を推定することができる手法である。SfM は並進方向と回転量のみ推定が可能であるため、実スケールでの推定を行うことができない。本研究ではレーザ投光点の3次元座標が実スケールで分かっていることを利用して、実スケールでのカメラの並進・回転量の推定を行う。

2.3. レーザ対応点検出

ある n 番目の画像におけるレーザ投光点が、他の画像において対応している点をレーザ対応点と呼ぶ。各画像間の対応点として、カメラ座標系原点からの実距離が計算できるレーザ投光点を対応点検出に用いることで SfM を用いた実スケールでの並進・回転変化量の推定を行うことができる [6]。

レーザ対応点を求めるにあたり、ブロックマッチングを用いる。テンプレートと探索画像の類似度計算を行い、レーザ対応点を検出する。類似度計算には、正規化相互相関 (ZNCC) を利用する。

3. 提案手法

本章では、まず対応点検出に用いているテンプレートマッチングについて説明を行う。テンプレートマッチングで用いられる類似度について説

明した後に、それらの高速化について述べる。最後に、本手法における高速化について説明する。

3.1. テンプレートマッチング

テンプレートマッチングでは、類似性を評価して、テンプレート画像と最も合致する部分を検出する。画像間の類似度を評価する評価式として、明るさの変動に強い類似度である ZNCC がよく用いられる。ZNCC は以下の式で定義される。

$$R_{zncc} =$$

$$\frac{\sum_{i,j=0}^{k-1,h-1} (f_1(i,j) - \bar{f}_1)(f_2(i,j) - \bar{f}_2)}{\sqrt{\sum_{i,j=0}^{k-1,h-1} (f_1(i,j) - \bar{f}_1)^2} \sqrt{\sum_{i,j=0}^{k-1,h-1} (f_2(i,j) - \bar{f}_2)^2}} \quad (5)$$

ここで、 f_1, f_2 は比較する2枚の画像であり、 \bar{f} は画像 f の平均画素値である。また、 k, h は画像の縦と横のピクセル数を表す。

この式を、全画素数 n の同じサイズの2枚の画像に適用した場合、計算量は $O(n^2)$ となる。

テンプレートマッチングで使用される他の類似度評価関数としては SAD や NCC があげられる。しかし、今回は、レーザ照射によって、レーザ照射部分周りでの輝度の変化を考慮する必要があるため、SAD や NCC などの照明の影響に弱い評価式ではなく ZNCC を用いる。

3.2. ZNCC 計算の高速化

ZNCC の計算を高速化する手法としては、[10][11][12]が挙げられる。[10]においては ZNCC の分子の部分をつリエ変換の畳み込みを利用して、周波数領域で計算を行い、分母の部分に事前に計算した積分画像を用いることで計算の高速化を図っている。[11]においては、近似を用いることで、ZNCC の計算の高速化を行っている。[12]は、[10]においてできていなかった、分母の部分の計算もフリエ変換の畳み込みを適応できるように変形させることで、ZNCC の式全体を周波数領域での計算に変換し、高速化を行っている。本研究では、FFT を用いて、ZNCC の計算の高速化を行う。

3.3. マスクを考慮した高速化

第2章において説明をした、環境中のテクスチャを利用した各断面形状の統合における課題として、対応点検出に時間がかかっているという点が挙げられる。全体の計算に対して、対応点検出が大半の時間を占めているため、この部分を高速化することが全体の計算時間短縮に効果的であ

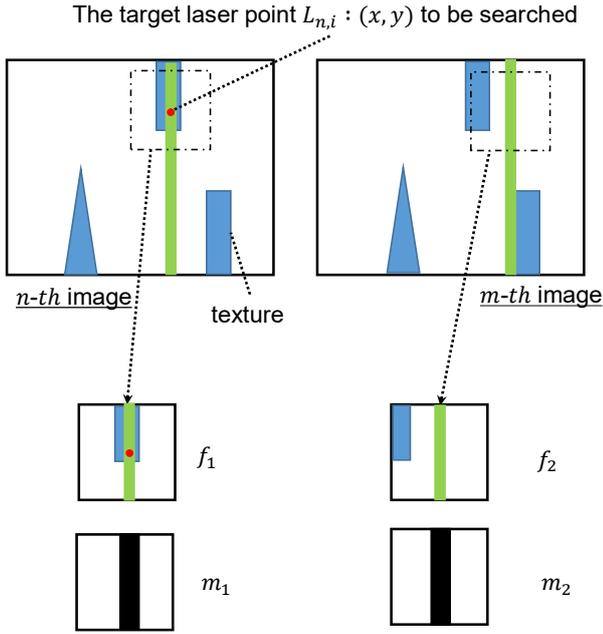


図4 対応画像の作成

る。しかし、レーザ光が画像中に存在している状態でそのままテンプレートマッチングを行った場合、レーザ光のテクスチャに影響され、誤った対応点検出を行う可能性がある。図3は誤った対応点検出の例を表している。各画像間に存在しているレーザのテクスチャが類似しているため、本来対応点ではない場所で対応点が検出される可能性がある。

本研究では、照射されているレーザ光領域を一定の大きさで膨らませてマスク画像を作成する(図4)。ある n 番目のフレームにおけるレーザ点 $L_{n,i}$ の周りで一定サイズ切り取った画像をテンプレート画像とする。 n 番目のフレームにおける点 $L_{n,i}$ の位置 (x,y) の周りで、隣接フレーム m における画像を切り取る。マスク画像を考慮してZNCCを用いた類似度計算を行うにあたり、式(5)~(8)を導入する。この式はZNCCの各係数についてフーリエ変換の畳み込みを利用し変換することで得ることができる [12]。この式により計算量は全探索の場合の $O(n^2)$ から $O(n \log(n))$ となり、高速化を図ることができる。ここでマスク画像とは、類似度計算の考慮に入れるピクセルの画素値を 1、考慮から除くピクセルを 0 とするような 2 値画像を指すこととする。

$$R_{zncc} = \frac{a}{b \cdot c} \quad (6)$$

$$a \equiv \mathcal{F}^{-1}(F_1 \cdot F_2) - \frac{\mathcal{F}^{-1}(F_1 \cdot M_2^*) \cdot \mathcal{F}^{-1}(M_1 \cdot F_2^*)}{\mathcal{F}^{-1}(M_1 \cdot M_2^*)} \quad (7)$$



図5 実験環境



図6 実験データの例

$$b \equiv \sqrt{\frac{\mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(f_1 \cdot f_1) \cdot M_2^*) - \frac{(\mathcal{F}^{-1}(F_1 \cdot M_2^*))^2}{\mathcal{F}^{-1}(M_1 \cdot M_2^*)}}{\mathcal{F}^{-1}(M_1 \cdot M_2^*)}} \quad (8)$$

$$c \equiv \sqrt{\frac{\mathcal{F}(M_1 \cdot \mathcal{F}(f_2 \cdot f_2)) - \frac{(\mathcal{F}^{-1}(M_1 \cdot F_2^*))^2}{\mathcal{F}^{-1}(M_1 \cdot M_2^*)}}{\mathcal{F}^{-1}(M_1 \cdot M_2^*)}} \quad (9)$$

画像 f_1, f_2 は対応点検出のための、あるレーザ投光点まわりで切り取った画像対である。画像 m_1, m_2 は f_1, f_2 に対応した 2 値であるマスク画像である。 \mathcal{F} はフーリエ変換を表し、 F_1, F_2, M_1, M_2 は画像 f_1, f_2, m_1, m_2 のフーリエ変換である。 M^* は M の共役複素数を表す。



図7 精度評価に用いた4点の様子

4. 実験

本章では、提案手法が回転運動時の3次元形状計測の高速化に有効であることを検証するために行った実験について説明を行う。

4.1. 実験環境・データ

今回使用した環境の様子と実験装置の様子を図5に表す。撮影によって得られた実験データの1つを図6に表す。本実験では、129枚の画像を使用した。実験の際には、装置は直進だけでなく、回転を含めた移動をさせながら撮影を行った。図6にあるように、壁面部と床部にレーザ光を照射し、照射部の形状を計測した。対応点探索の際には、レーザ投光点座標を中心とした周りでテンプレートを取り、テンプレートサイズを280px×280pxとした。探索領域として、探索対象のフレームにおいて、440px×440pxの範囲を設定した。

4.2. 精度評価方法

復元された結果について、テクスチャ部分を除いた範囲の壁面と床面の平面度を評価して、復元精度の比較を行った。図5におけるポスター下側の壁面と床面は、平面であると仮定し、計算結果から対象の範囲を抽出した。その後、その対象の範囲について、最小二乗法を用いて平面の式を求め、各点と計算された平面との距離の差を誤差として調べた。

また、図7にある代表点4つを環境中に設定し、各点間の実際の距離と、計算によって得られた推定距離とを比較した。

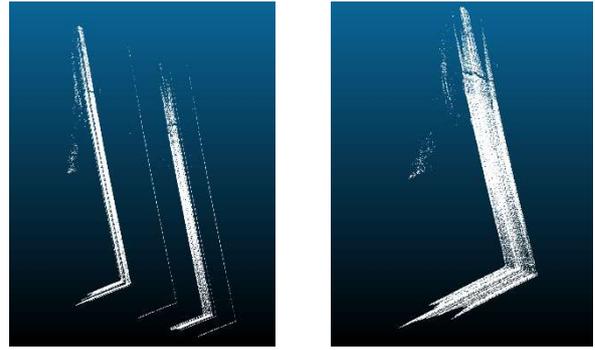


図8 従来手法による復元結果（左）と提案手法による復元結果（右）

表1 平面度

	床面・平均誤差 [mm]	壁面・平均誤差 [mm]
提案手法	2.19	3.04

表2 4点の距離の計算結果と真値

	1-2間 [mm]	2-4間 [mm]	3-4間 [mm]	1-3間 [mm]
計算値	651.2	180.1	646.4	180.7
真値	636.5	349.0	632.0	350.0

表3 計算時間の結果

	対応点検出 [h]	全体 [h]
従来手法[6]	61.97	67.08
提案手法	3.75	3.92

4.3. 実験結果

3次元形状が復元された結果を図8に示す。左図では、従来手法で復元された結果を表し、右図は提案手法で復元された結果を表す。従来手法での復元結果では、一部のフレーム間において、対応点検出に失敗したため、形状が正確に統合できなかった。提案手法による結果においては、進行方向の計測距離が縮小した結果が得られた。壁面と床面の平面度は、表1のように得た。また、図7の4点間の計測結果については表2示す。形状の復元について、従来手法[6]、提案手法ともに正しく復元することができなかったが、提案手法によって、目的として設定していた高速化を行うことができた。計算時間の結果を表3に示す。対応点検出部分での計算時間は従来手法の約6.1%で、全体としては従来手法の約5.9%の時間で計算を実行することができた。

5. 結論

本研究では、レーザの影響に頑健なマスクを考慮可能かつ、周波数領域で計算を行う対応点検出の手法を用いて、3次元形状計測の高速化を行った。今回行った回転運動を含んだ計測においては、いくつかのフレーム間で評価を行い、従来手法[6]と提案手法の両方において、対応点検出に失敗する部分があり、形状を正確に復元できなかった。しかし、この手法によって、従来手法の約6%の時間で計算を行うことができ、目的であった高速化を実現することができた。

今後の課題としては、回転にロバストに対応点を検出する工夫を行うことが挙げられる。

また[6][9]においては、画像中の消失点の利用によって、カメラの運動推定の計算時に、拘束条件を追加することで、高精度な復元を行っていた。しかし、今回の回転を行った実験を行った環境においては、消失点を利用できなかったため、拘束条件を追加しなかった。提案手法による3次元形状復元が、カメラ進行方向に縮んだことについては、そうした拘束条件を導入することで解決できる可能性がある。

参考文献

- [1] 河村 幸二. “3次元計測の最近技術と市場動向,” 精密工学会誌, vol. 79, No. 5, pp. 388-391, 2013.
- [2] 月山 陽介. “鉄道車両用レーザー3次元座標測定システムのデータ接続手法の開発,” 精密工学会誌, vol. 80, no. 5, pp. 675-681, 2014.
- [3] S. F. El-Hakim, J. Beraldin, M. Picard and G. Godin, “Detailed 3D Reconstruction of Large-Scale Heritage Sites with Integrated Techniques,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 24, no. 3, pp. 21-29, 2004.
- [4] C. Cadena, L. Carlone, H. Carrillo, Y. Latif, D. Scaramuzza, J. Neira, I. Reid, and J. J. Leonard, “Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age,” IEEE Transactions on Robotics., vol. 32, no. 6, pp. 1309-1332, 2016.
- [5] S. Rusinkiewicz and M. Levoy, “Efficient variants of the ICP algorithm,” Proceedings of the 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 145-152, 2001.
- [6] 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3次元計測. 日本ロボット学会誌”, vol. 37, no. 3, pp. 222-232, 2018.
- [7] 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 Omnidirectional Rangefinder,” Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2011), pp. 1017-1023, 2011.

- [8] 松井 建樹, 山下 淳, 金子 透, “全方位レーザ・全方位カメラからなるレンジファインダの自己位置推定と配管の3次元モデル生成”, 電気学会論文誌C, vol. 130, no. 9, pp. 1504-1512, 2010.
- [9] M. Kawata, H. Higuchi, H. Fujii, A. Taniguchi, M. Watanabe, A. Yamashita, H. Asama, “Acceleration of 3D Measurement of Large Structures with Ring Laser and Camera via FFT-based Template Matching”, Proceedings of the 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2019), 2019.
- [10] J. P. Lewis, “Fast Template Matching,” Vision Interface, pp. 120-123, 1995.
- [11] K. Briechle, U. D. Hanebeck, “Template Matching using Fast Normalized Cross Correlation,” Proceedings of SPIE 4387, Optical Pattern Recognition XII, 2001.
- [12] D. Padfield, “Masked Object Registration in the Fourier Domain,” IEEE Transactions on Image Processing, vol. 21, no. 5, pp. 2706-2718, 2012.

川田 桃子: 2018年3月東京大学農学部生物・環境工学専修卒業。2018年4月東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻修士課程入学。

樋口 寛: 2016年3月東京大学工学部精密工学科卒業。2018年3月東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻修士課程修了。2018年4月東京大学大学院工学系研究科博士課程入学。長尺構造物の3次元計測の研究に従事。

藤井 浩光: 2007年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。2007年～2013年ソニー株式会社正規職員。2014年～2016年日本学術振興会特別研究員(DC2)。2016年～2017年東京大学大学院工学系研究科特任助教。2017年～2018年同大学院特任講師。2018年より千葉工業大学先進工学部 准教授, 博士(工学)(東京大学)。

谷口 敦史: 2007年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了, (株)日立製作所入社。現在, (株)日立製作所 研究開発グループ 生産イノベーションセンタ主任研究員。博士(工学)。日本光学会会員, アメリカ光学会会員。

渡辺 正浩: 1988年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修了, (株)日立製作所入社。1994-95年Columbia大学客員研究員などを経て, 現在, (株)日立製作所 研究開発グループ 生産イノベーションセンタ主任研究員, 北

海道大学大学院情報科学研究科客員教授。光学応用検査・計測技術の研究開発に従事。博士（工学）。精密工学会会員，米国 SPIE 会員。

山下 淳: 2001 年 3 月東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了，博士（工学）。静岡大学助手，助教，准教授を経て，2011 年 10 月東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻准教授，現在に至る。知能ロボット，コンピュータビジョン，画像処理の研究に従事。

浅間 一: 1984 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1986 年理化学研究所研究員補。同副主任研究員等を経て，2002 年東京大学人工物工学研究センター教授。2009 年同大学院工学系研究科教授。IEEE フェロー。日本ロボット学会フェロー。日本機械学会フェロー。