

特徴が少ない環境の3次元計測のための2台のカメラによるスペックル運動推定

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

本研究では、テクスチャや凹凸などの特徴が少ない環境における3次元計測への利用が可能な実スケールの運動推定手法を提案する。特徴が少ない環境下で運動を検出するために、レーザ照射により生じるスペックルを利用する。スペックル観測用と奥行き計測用の2台のカメラから得られる情報を統合することにより高精度な計測を実現する。運動推定を利用した3次元計測実験により提案手法の有効性を確認した。

1. 序論

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実用化が進んでいる。レーザ計測の計測範囲は計測器から照射したレーザを観測可能な範囲に制限される。大型構造物や障害物が存在する環境においては、全体形状を一度に計測することができないため、複数地点の計測データを統合する必要がある。代表的なアプローチとして、レーザ計測による3次元形状¹⁾やカメラによるテクスチャ情報²⁾などの特徴量に基づく統合手法が利用される。しかし、この方法は環境中に特徴的な構造の存在を仮定するため、テクスチャレスな平坦構造のように特徴が少ない環境に対しては適用できない。

本研究ではスペックルを利用した運動推定によりこの問題を解決する。スペック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、反射光の干渉により発生する高コントラストなパターンである。スペックルはレーザ照射面の微視的な表面粗さに起因するため、巨視的な構造に依存しない特徴量として運動推定に利用可能である。計測系の位置・姿勢とスペックル変化の関係を利用した運動推定の研究として、スペックルエンコーダの開発³⁾や、6自由度の運動推定システムの提案⁴⁾などが行われている。

筆者らはスペックルによる運動推定の3次元計測への応用として、カメラ、ラインレーザ、スポットレーザを利用してスペックルに基づく運動推定と光切断法を組み合わせた手法を提案した⁵⁾。従来のスペックル運動推定手法⁴⁾はボケの大きな画像の利用を前提とするため、投影パターンの検出を必要とする光切断法と組み合わせることができない。この研究では、光切断法により得られる奥行き情報を考慮することにより、ボケの小さな画像からでも運動推定が可能なモデルを構築し、1台のカメラによる画像からスペックル運動推定と光切断法を同時に実行可能な計測手法を提案した。しかし、スペックル変化を明瞭に観測するためには依然としてボケを含む画像が必要である反面、投影パターンのボケが大きければ形状計測の精度が低下する。運動推定と光切断法の精度がトレードオフの関係となる点が全体の精度を向上させる上で問題である。

本研究では、スペックル観測用と光切断法による奥行き計測用の役割の異なる2台のカメラを利用することにより、上記の問題を解消し高精度な3次元計測が可能な手法を提案する。

2. 提案手法

本研究では、2台のカメラ、ラインレーザ、スポットレーザを利用した3次元計測システムを提案する。提案システムの模式図をFig. 1に示す。一方のカメラにはラインパターンを観測す

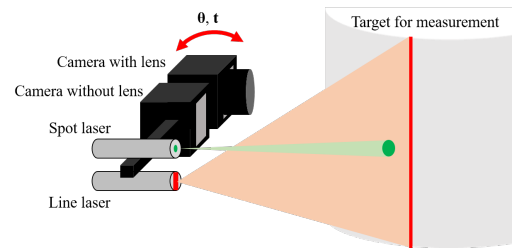


Fig. 1: 提案する3次元計測システムの模式図

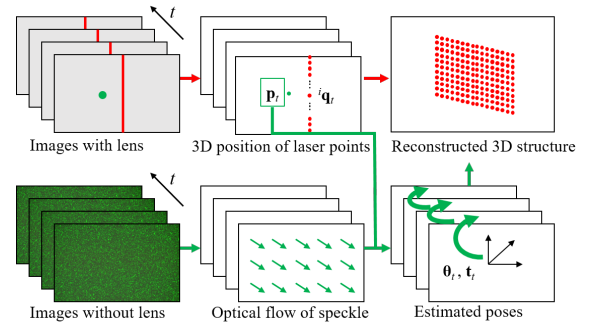


Fig. 2: 3次元計測の流れ

るために通常視野のレンズを装着し、他方のカメラにはスペックルの変化を明瞭に観測するためにレンズを装着せず、センサに直接入射する光の強度からスペックルを観測する。ラインレーザとスポットレーザには異なる色の光源を使用する。

計測の流れをFig. 2に示す。まず、レンズありカメラ画像からレーザ投光点の3次元座標を計測する。画像にはスポットレーザとラインレーザによるレーザ投光点が表示される。レーザと同色のカラープレーンでレーザ光の輝度値が高くなることを利用し、各レーザ色のカラープレーンからレーザ投光点を検出し、三角測量により3次元座標を計測する。この処理により各フレームのカメラ座標系におけるスポットレーザとラインレーザの投光点の3次元座標が得られる。

続いて、位置・姿勢変化を求めることにより運動を推定する。位置・姿勢変化とスペックル移動の間には以下の関係が成立する。

$$\frac{d+l}{pl} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{pu}{d} \\ 0 & 1 & -\frac{pv}{d} \end{bmatrix} \mathbf{t} - \frac{d}{p} \begin{bmatrix} 0 & -1 & \frac{pv}{d} \\ 1 & 0 & -\frac{pu}{d} \end{bmatrix} \boldsymbol{\theta} - \begin{bmatrix} u' - u \\ v' - v \end{bmatrix} = \mathbf{0}. \quad (1)$$

ただし、 (u, v) , (u', v') はそれぞれ移動前後のスペックルの画像座標、 $\boldsymbol{\theta}$, $\mathbf{t}$ は装置の回転と並進、 p はセンサの1ピクセルの実寸、 d と l はそれぞれカメラ原点とスポットレーザ光源からス

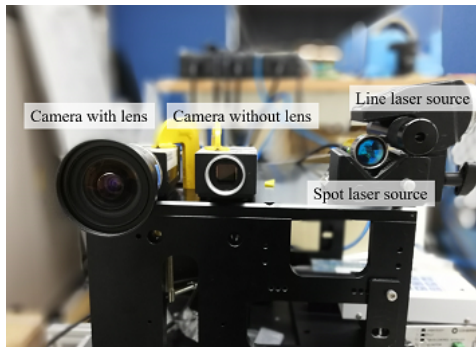


Fig. 3: 計測装置

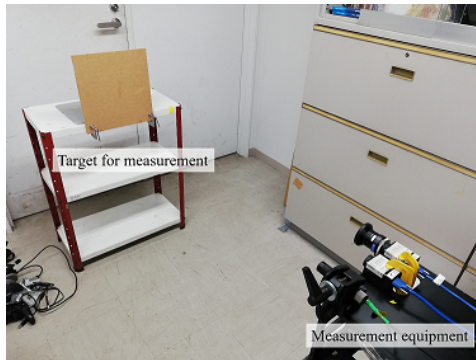


Fig. 4: 実験環境

ポットレーザ投光点までの距離を表す。スペックルの移動はレンズなしカメラの画像を小領域に分割し、フレーム間で位相限定相関 (POC) ⁶⁾ を計算することにより検出する。また、スポットレーザ投光点の 3 次元座標は前述の 3 次元計測処理で得られており、スポットレーザの光源位置は事前にキャリブレーションすることができる。したがって、 d, l についても計算が可能である。以上より、 $(u, v), (u', v'), d, l$ を既知として、式 (1) を位置・姿勢変化 θ, t について解くことにより運動を推定する。

最後に、フレーム間の位置・姿勢変化を利用して、各フレームのカメラ座標系における 3 次元座標を統一座標系に変換することにより、全体の 3 次元形状を復元する。

3. 3 次元計測実験

提案する 3 次元計測手法を検証するための実験を行った。実験には 2 台のカメラ、ラインレーザ、及びスポットレーザを配置した Fig. 3 に示す計測装置を使用した。カメラには POINT GREY 製カメラ GS3-U3-41C6C-C を使用し、ラインレーザとスポットレーザの波長はそれぞれ 650 nm, 532 nm を使用した。Fig. 4 に示すように、計測対象のテクスチャレスな平板をカメラ正面に配置し、計測装置をカメラ光軸と垂直に電動リニアガイドにより 100 mm 水平移動させた。

実験結果を Fig. 5, Fig. 6 に示す。Fig. 5 は提案手法による各フレームにおける水平・垂直方向の並進量の推定結果である。横軸にフレーム、縦軸に初期値からの移動量を示している。水平・垂直の両方の結果で、傾きがほぼ一定の直線が得られていることから、等速運動を推定できていることが確認できる。最終フレームにおける推定値は水平が 110 mm, 垂直が 0.02 mm となり、真値に対する移動距離の誤差は約 10 mm であった。Fig. 6 は計測対象の平板のラインレーザが走査した領域を運動推定の

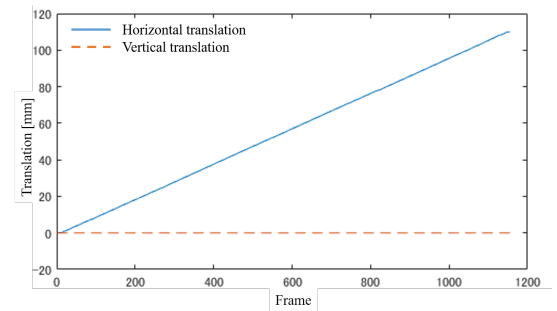


Fig. 5: 運動推定結果

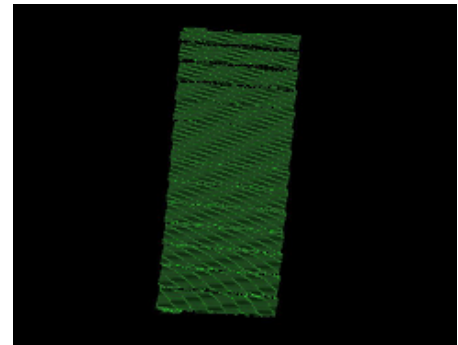


Fig. 6: 3 次元計測結果

結果に基づき復元した結果である。平板の形状が正常に復元できていることが確認できる。

4. 結論

2 台のカメラを用いたスペックルに基づく 3 次元計測システムを提案した。実験結果から 100 mm の並進に対して、約 10 mm の誤差で並進推定が可能であることを確認した。

本稿では提案手法による並進移動推定の性能検証を行ったが、奥行方向の並進、及び回転推定への有効性を検証することが今後の課題である。

参考文献

- 1) P. J. Besl and N. D. McKay: "A Method For Registration of 3-D Shapes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, 1992.
- 2) A. Duda, J. Schwendner, and C. Gaudig: "SRSL: Monocular Self-referenced Line Structured Light", Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 717–722, 2015.
- 3) I. Nagai, G. Yamauchi, 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.
- 4) K. Jo, M. Gupta, and S. K. Nayar: "SpeDo: 6 DOF Ego-Motion Sensor Using Speckle Defocus Imaging", Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 4319–4327, 2015.
- 5) 樋口 寛, 藤井 浩光, 谷口 敦史, 渡辺 正浩, 山下 淳, 浅間 一: "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ックル移動推定", 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集 (SI2018), pp. 2706–2711, 2018.
- 6) K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, and K. Kobayashi: "High-accuracy Subpixel Image Registration Based on Phase-only Correlation", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. 86, No. 8, pp. 1925–1934, 2003.