

全天球カメラとリングレーザを用いた屋内3次元計測のためのキャリブレーション

Calibration for Indoor 3D Measurement Using Spherical Camera and Ring Laser

入山真伍 (中央大) ○ Sarthak Pathak (中央大学)

正 梅田和昇 (中央大)

Shingo IRIYAMA, Chuo University, iriyama@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

Sarthak PATHAK, Chuo University,

Kazunori UMEDA, Chuo University,

In this study, we evaluated 3D measurement in real environments using 3D measurement sensor consisting of a spherical camera and a ring laser proposed by conventional study. However, we could not have obtained results that we expected. We consider that the cause of failure in high-precision 3D measurement was that we could not calculate accurate geometric relationship between the camera and the laser. Therefore, in this study, we propose a calibration method for this sensor. Using two spherical stereo cameras, we reconstructed the 3D point cloud of laser plane. We conducted plane estimation on the reconstructed point cloud. We proposed a method to determine the geometric relationship between the camera and the laser based on plane estimation.

Key Words: Image Processing, 3D Measurement, Spherical Camera

1 緒言

1.1 研究背景

工業先進国では、様々な大型インフラや産業機械が存在する。しかし、長い年月を経つと、これらの大型構造物は経年劣化するため、保守運用の業務は必須である。従来の保守運用は、主に人の手によって行われてきたが、熟年作業員や少子高齢化による業務の担い手が減少しているため、大型構造物の点検の自動化は緊急の課題となっている [1]。近年、高度な3次元計測技術は、大型設備のメンテナンスなどに広く応用されている [2]。3次元計測センサを用いることで、人が近づけない危険な場所でも、構造物内の老朽箇所や形状異常を発見することができる。これにより作業員の安全を確保しつつ、作業時間も短縮できるため、効率的なインフラ保全を実現する。加えて、自動車の自動運転の技術開発が急速に進んでいる。工場やショッピングモール、空港などの屋内施設にも自律移動ロボットが導入され、運搬作業や警備業務の代替に応用されている。自動車や自律移動ロボットが円滑に走行するためには、交通信号や交通標識を識別して、目的地までの地図情報に基づいて適切に走行する必要がある。また、道路上の他の移動ロボットや歩行者、障害物などを検知し、適切に減速する必要がある。これらを実現するためには、ロボットは周囲環境を正確に把握しなければならない。多くの自律移動技術は、事前に用意した構造物内の地図とカメラやレーザスキャナより取得した点群情報をICPアルゴリズム等でマッチングさせることで、ロボットの自己位置推定を行っている [3][4]。よって、正確な自己位置推定や経路計画のために、高精度な周囲の形状計測が可能なセンサの開発が行われている。本研究では、低コストかつ高精度な3次元計測手法の提案とセンサの開発を行う。

全方位の3次元計測センサの一つにTime of Flight (ToF) [5]を利用したLight Detection And Ranging (LiDAR)がある。光源から測定対象物までレーザ光を照射し、その反射光を受光するまでの光の飛行時間を計算することで、距離計測する。しかし、LiDARセンサは装置自体の価格が高いという欠点がある。一方で、比較的安価で密な点群を取得できる手法として、カメラとレーザによる光切断法 [6]がある。直線状のレーザ光を測定対象物に投影したのちに、カメラで投影されたレーザ光を撮影し、三角測量の原理に基づいて対象物の3次元形状を取得する手法である。一度の撮影では限られた部分しか復元できないので、複数の計測箇所の点群を統合することで全体の3Dモデルを生成する。安価で高精度な3次元計測の実現するために、本研究では光切断法を用いた手法を提案する。

1.2 従来研究

従来研究では、カメラとレーザによる様々な大規模な構造物の3次元計測が提案されている。樋口らは、カラーフィルタに

よるレーザ光の抽出を用いた光切断法とStructure from Motion (SfM) [7]を組み合わせ、持ち運び可能な計測装置を提案した [8]。これにより環境光の影響を受けにくいレーザ光の抽出が可能となり、様々な環境下での3次元計測が可能となる。川田らは全天球カメラとリングレーザを用いた光切断法の点群と、SfMによって得られた点群を比較することで、スケール推定の手法を提案した [9]。全天球カメラは周囲360度を一度に撮影することができるため、計測環境内の全体に対して対応点マッチングをすることができ、3次元計測の精度を向上させる。両者の研究は、共に複数のレーザ点群の断面を統合して密な3次元モデルを取得するために、SfMによって算出されたカメラ運動を用いている。また、画像内の直線情報を用いてカメラの姿勢推定を行い、その姿勢量に基づいて複数の断面点群を統合する手法が提案されている [10]。しかし、実環境での手法の有効性は確認できておらず、センサのキャリブレーションも行われていない。よって、本研究では、実環境での3次元計測とキャリブレーション手法の提案を目的とする。

2 従来研究の3次元計測

2.1 センサの構造と計測方法

Fig.1に本研究で用いるセンサを示す。全天球カメラとリングレーザを3Dプリンタで作成した土台に固定し、三脚に設置した。Fig.2に理想的なカメラとレーザの位置関係を示す。全天球カメラのカメラ座標系の1軸とリングレーザによるレーザ照射断面は垂直に交わるとし、 $\vec{n}$ に示す。

ここで、実空間でのレーザ光が照射された点を X_j 、球面座標上に投影された点を x_j 、スケール s とすると、式(1)が成り立つ。

$$X_j = s \cdot x_j \quad (1)$$

また、 X_j と $\vec{n}$ には、式(2)の関係が成り立つ。

$$(X_j - n) \cdot n = 0 \quad (2)$$

式(1)と(2)を解くことで、ワールド座標系上の X_j を求めることができる。

屋内環境の全方位3次元計測を行うために、センサ全体を回転させながら、各姿勢でレーザの断面点群を復元を行う。また、画像内の直線特徴量を用いてカメラの姿勢推定を行い、その姿勢量に基づいて複数の断面点群の統合を行う。

2.2 実験環境と条件

実験環境とセンサをFig.3に示す。実験環境は中央大学後楽園キャンパスの2629室とする。本実験では、3D-LiDARセンサであるFARO社のFOCUS MとVelodyne Lidar社のVLP-32C、



Fig.1 Developed sensor and relationship and camera and laser

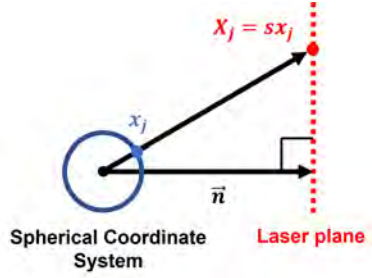


Fig.2 Triangulation

製作したセンサの3種類を用いて、屋内環境の点群を取得し比較する。全天球カメラは、解像度 11008×5504 pixel の RICOH 社の THETA X を用いる。赤色リングレーザーは波長 660 nm、出力 19.6 mW である。センサは、三脚の回転軸の目盛りをもとに、5 deg ずつ回転させながら断面点群を復元する。

2.3 3次元計測結果

Fig.4(a) は FARO FOCUS による点群、Fig.4(b) は Velodyne VLP-32C による点群、Fig.4(c) は提案手法による点群を示す。計測対象である 2629 室の形状と比較すると、提案手法による室内の点群は正しく復元できているとは言えない。Fig.4(c) は複数の断面点群が歪んでいる。また、ノイズを多く含んでいる。主な原因は、カメラとレーザーとの相対的な位置・姿勢を正確に取得できていないことであると考察している。光切断法において、カメラとレーザーの位置関係は 3 次元点群を復元するうえで重要なパラメータであるため、センサのキャリブレーション手法を考案する必要がある。

ここで、キャリブレーションで求める必要がある値は、Fig.1 に示すカメラ座標系原点からレーザー平面までの法線ベクトル $\vec{n}$ とする。

3 センサのキャリブレーション手法

3.1 キャリブレーション手法の概要

本研究では、Fig.5 に示すようにセンサ本体と追加の全天球カメラを用意し、室内の設置した。全天球カメラのステレオビジョンの原理を用いた手法でキャリブレーションを行う。フローチャートを Fig.5 に示す。2 台の全天球カメラで、それぞれ屋内画像と暗室でのレーザー光照射画像の 2 種類の画像を取得する。屋内画像からは、8 点アルゴリズム法 [11] に基づいた 2 台の全天球カメラの回転行列と並進ベクトルを算出する。次に、位置姿勢情報とレーザー照射画像より、ワールド座標系上の照射領域の 3 次元点群を復元する。復元された点群に対して、平面推定を行うことで、センサを構成する全天球カメラとリングレーザーに幾何学的関係値を求める。

3.2 2 台の全天球ステレオカメラの位置姿勢関係の算出

2 台のカメラ間の位置姿勢関係を求めるために、Fig.7 のそれぞれのカメラで取得された 2 枚の屋内画像の対応点をマウスでクリックにし、対応点の画像座標を取得する。 $\mathbf{E}$ は基本行列とし、 $\hat{\mathbf{m}}_1$ と $\hat{\mathbf{m}}_2$ を 2 台の異なる全天球カメラによって撮影された画像内の対応するピクセルを指す単位ベクトルとすると、式 (3) が成り立つ。

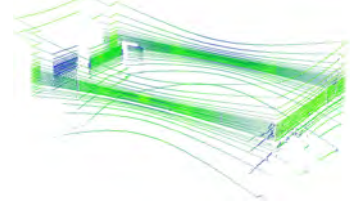
$$\hat{\mathbf{m}}_2^T \mathbf{E} \hat{\mathbf{m}}_1 = 0 \quad (3)$$



Fig.3 Room 2629



(a) FARO FOCUS M



(b) Velodyne VLP-32C



(c) Developed sensor

Fig.4 The point cloud of the room 2629

基本行列 $\mathbf{E}$ を算出した後、特異値分解をすることで回転行列 $\mathbf{R}$ と並進ベクトル $\mathbf{t}$ を得ることができる。

3.3 レーザ照射断面の復元と平面推定

節 3.2 で求めた $\mathbf{R}$ と $\mathbf{t}$ を用いて、カメラ座標系上の点 $\hat{\mathbf{x}}$ とワールド座標系上の $\mathbf{X}_w$ の関係を表す透視投影行列 $\mathbf{P}$ が算出する。また、レーザー断面を復元する際も、2 台の全天球カメラから取得されたレーザー光照射画像の対応点をマウスクリックによって取得する。対応点座標をそれぞれ $\hat{\mathbf{m}}_1$ と $\hat{\mathbf{m}}_2$ とし、それぞれの透視投影行列を $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$ とすると、式 (4) と式 (5) が成り立つ。

$$\hat{\mathbf{x}}_1 \sim \mathbf{P}_1 \tilde{\mathbf{X}}_w \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_2 \sim \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{X}}_w \quad (5)$$

式 (4) と式 (5) と展開し、最小二乗解を算出すると、ワールド座標系上の点 $\mathbf{X}_w$ を取得できる。レーザー照射面の 4 点を復元した結果を Fig.9 に示す。本研究では、オープンソースの点群処理ソフトである Point Cloud Library を用いて、復元された断面点群に平面をあてはめることにより、Fig.9 の推定平面の法線ベクトルを取得する。

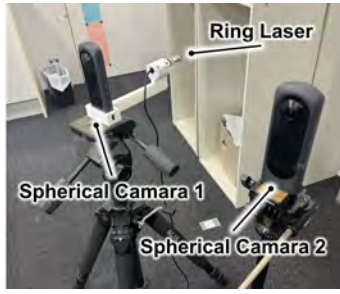


Fig.5 Setup for calibration

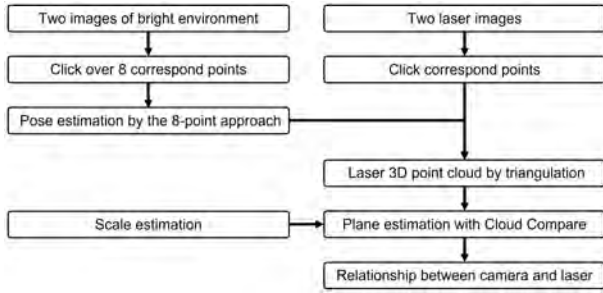


Fig.6 Flowchart

4 結論

本研究では、全地球カメラとリングレーザを用いた従来手法を用いて、中央大学後楽園キャンパスの2629室を実環境とした3次元計測を行った。既存の3D-LiDARセンサの計測結果と比べると、製作したセンサによって取得された3次元点群は、正しく室内形状を復元できていないといえる。また、高精度な3次元計測ができていない原因として、カメラとレーザの正確な幾何学的関係を取得できていないことであると考察し、センサのキャリブレーション手法を提案した。具体的には、全地球ステレオカメラによってレーザ照射断面を復元し、Point Cloud Libraryの平面推定によってカメラとレーザの法線ベクトルを算出する。今後は、提案したキャリブレーションによって得られたパラメータを用いて、実環境の計測実験と精度評価を行う。

参考文献

- [1] 増田宏, “大規模環境の3次元計測と認識・モデル化技術の現状,” 精密工学会誌/Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.84, No.10, 2018.
- [2] Geng, J., “Structured-light 3d surface imaging: A tutorial,” *Advances in Optics and Photonics*, vol.3, no.2, (2011) pp.128–160.
- [3] Besl, P. and McKay, N., “A method for registration of 3-d shapes,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14-2, pp. 239-256, 1992.
- [4] Dellaert, F., Fox, D., Burgard, W. and Thrun, S., “Monte Carlo Localization for Mobile Robots,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1322-1328, 1999.
- [5] 安富啓太, 川人祥二, “Time-of-Flight カメラ,” 映像情報メディア学会誌 Vol.70, No.6, pp. 880-885, 2016.
- [6] Geng, J., “Structured-light 3d surface imaging: A tutorial,” *Advances in Optics and Photonics*, vol. 3, no. 2, pp. 128–160, 2011.
- [7] Agarwal, S., Furukawa, Y., Snavely, M., Simon, I., Curless, B., Seitz, S. and Szeliski, R., “Building rome in a day,” *Communications of the ACM*, vol. 54, no. 10, pp. 105-112, 2011.
- [8] Higuchi, H., Fujii, H., Taniguchi, A., Watanabe, M., Yamashita, A. and Asama, H., “3D Measurement of Large Structure by Multiple Cameras and a Ring Laser,” *J. Robot. Mechatron.*, Vol.31 No.2, pp. 251-262, 2019.
- [9] Kawata, M., Higuchi, H., Pathak, S., Yamashita, A. and Asama, H., “Scale Optimization of Structure from Motion for

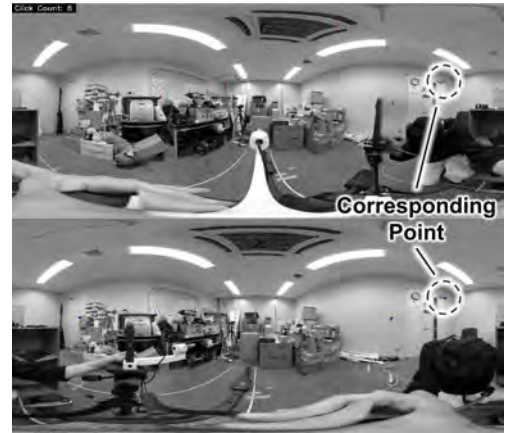


Fig.7 Clicking eight corresponding points

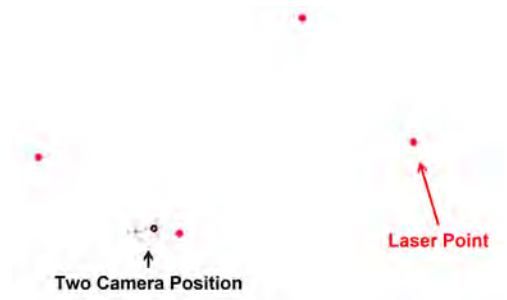


Fig.8 Reconstructed laser points and two camera position

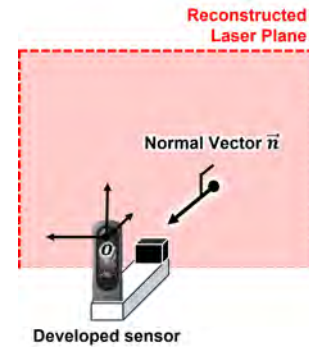


Fig.9 Reconstructed laser plane and normal vector

Structured Light-based All-round 3D Measurement,” *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Melbourne, pp. 442-449, 2021.

- [10] Iriyama, Pathak, S. and Umeda, K., “Three-Dimensional Environmental Measurement of Surroundings Using Camera Pose Estimation Base on Line Features,” *2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 135-140, 2024.
- [11] Hartley, R. I., “In defense of the eight-point algorithm,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 580-593, 1997.