

直線特徴量に基づくカメラの姿勢推定による屋内環境の3次元計測

Indoor 3D measurement using camera pose estimation based on line features

中央大学 ○入山 真伍, Pathak Sarthak, 梅田 和昇

Chuo University ○Shingo Iriyama, Pathak Sarthak, Kazunori Umeda

1 緒言

高精度な3次元計測技術は、大型設備のメンテナンスやインフラ保全の保守運用において重要である。現在、全方位3次元計測の3次元計測には様々な手法や装置が用いられている。その中のLiDARセンサは、対象物にレーザ光を照射し散乱光を測定することで、距離や形状を計測する装置である。しかし、LiDARセンサは測定対象物までの距離が大きくなると取得される点群の密度が低下することや、装置自体の価格が高いという欠点がある。したがって、高精度かつコスト面にも優れた3次元計測装置の需要が高まっている。

従来研究では、全天球カメラと円周レーザの光切断法を利用した屋内環境の3次元計測の研究[1]がある。光切断法で取得した3次元点群を、SFMによって得られたカメラの位置姿勢情報に基づき融合するという手法であるので、屋内環境のテクスチャに依存してしまい、テクスチャが少ないと姿勢推定と3次元計測の精度に影響を及ぼす。本研究では、従来研究のカメラの姿勢推定の過程を改善したテクスチャレスな環境にも対応できる全天球カメラと円周レーザを用いた3次元計測の手法を提案する。具体的には、模様のない屋内環境でも、壁や天井の境目であるエッジは取得できると仮定して、環境内の直線特徴量に注目したカメラの姿勢推定を行う。また、マンハッタンワールド仮説[2]に基づき、実空間の直線は全て直行していると仮定する。この際、全ての直線は3つ方向を向いており、実空間の3つの消失点方向と等しくなる。よって、撮影画像内の直線の分布から実空間の消失点方向を算出し、カメラ座標系と方向と比較することで、実空間に対するカメラの姿勢推定が可能となる。全天球カメラは周囲360°を撮影することが可能であり、カメラがいかなる方向を向いていても、屋内環境の全ての直線を画像内に取得することができるため、本研究で採用した。

本研究での計測装置の概念図をFig.1に示す。全天球カメラと円周レーザを三脚に固定し、鉛直方向を装置全体を回転させながら撮影を行う。各フレームでレーザ点群の取得とカメラの姿勢推定を行う。

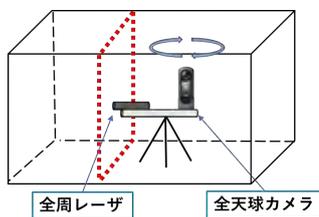


Fig.1. 計測装置の概要

2 提案手法

2.1 3次元点群の取得

全天球カメラでレーザ照射領域を撮影した後に、赤色のレーザ領域を画素値255、それ以外を画素値0とする二値化処理を行う。次に円周レーザの重み付き重心位置を求める。二値画像内のレーザ光が円周形状をしている特性を考慮して、画像の u, v 方向から重み付き平均を計算する。2つの u, v 方向の重心位置座標の合算を円周レーザ光の重心位置としてみなす。重み付き重心画像と全天球カメラと円

周レーザの幾何学的関係性から3次元点群を復元する。

2.2 カメラの姿勢推定

室内の全天球カメラで撮影された正距円筒画像内の直線を深層学習[3]によって検出する。直線検出後の正距円筒画像をFig.2に示す。次に、Fig.3に、空間内の直線領域の分布とワールド座標系とカメラ座標系の関係を示す。空間内の直線はワールド座標系 $x_{world}, y_{world}, z_{world}$ のいずれかの方向を向いており、直線の特徴量として用いることで、ワールド座標系とカメラの座標系を比較することができる。以下の手順により、カメラの姿勢推定を行う。

1. 画像内の直線を単位球面上の3次元座標に変換する。
2. 1本の直線の点群からランダムに2点 p_1, p_2 を選択し、外積計算を行うことで直線の単位法線ベクトル n_{12} を取得する。(Fig.4)
3. 同一方向を向く直線の法線ベクトルは、単位球面上で同一の平面上に存在する性質[4]があるので、全ての直線の法線ベクトルをカメラ座標系の x, y, z との平面フィッティングを行う。(Fig.5)

直行する3方向の直線の単位法線ベクトルは、単位球面上で3つの平面のいずれかに分類することができる。カメラの姿勢が変化すると、正距円筒画像内の直線の配置も変化し、単位法線ベクトルの分布も変化する。この変化量をLevenberg-Marquardt法を用いて算出することで、カメラの姿勢変化量を求める。姿勢量に基づき複数のレーザ光の3次元点群を融合し、室内全体の形状を計測する。



Fig.2. 直線検出画像

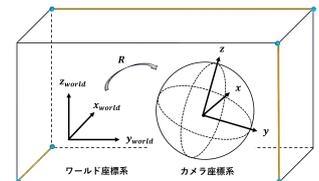


Fig.3. 直線と座標系の関係

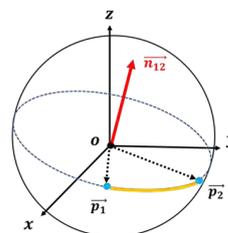


Fig.4. 直線の法線ベクトル

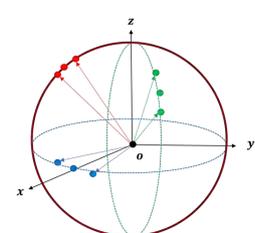


Fig.5. 3平面のフィッティング

3 実験環境

実験環境は3DCG統合開発環境のBlenderのテクスチャの少ない室内[5]とし、Fig.6に示す。シミュレーション環境下では、カメラの動かし方や計測対象の真値を得られるので、定量的評価が可能となる。入力画像は1920×960の解像度とする。室内の鉛直方向を回

転軸とし、1回あたりの回転量を5°と設定する。カメラ姿勢を72回回転させ、周囲360°の計測実験を行う。



Fig.6. Blender の屋内環境

3.1 姿勢推定

直線特徴量に基づくカメラの姿勢推定を評価するためにクォータニオンの回転量を算出した。推定結果を Table1 に示す。

Table1: 姿勢推定の結果 [degree]

Frame	True degree	Estimated degree	Error degree
1	0.00	0.812	-0.812
2	5.00	5.48	-0.483
3	10.0	9.93	-0.067
4	15.0	15.5	-0.512
5	20.0	17.8	2.20
6	25.0	24.5	0.471
7	30.0	29.3	0.729

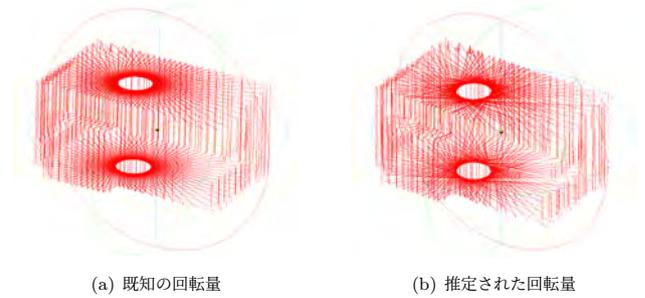
誤差角度はクォータニオンの真値の角度から推定角度を引いた値とした。72回の計測結果の誤差角度の標準偏差は1.31°となった。誤差が生じる原因は、深層学習による部屋の正距円筒画像内の直線抽出を行う処理にあると考えられる。Fig.2の直線の検出結果では、実際の部屋のかどよりも、ずれた位置に直線を検出した出力画像になっているため、正しいカメラの姿勢推定ができていないと考察できる。

3.2 3次元計測の精度評価

既知のカメラ姿勢に基づいて融合した室内全体の点群を Fig.7(a) に示し、提案手法を用いた結果を Fig.7(b) に示す。3次元点群の融合に姿勢推定の結果が及ぼす影響を評価するために、3D点群処理ソフトウェアの Cloud Compare を用いて平面推定を行う。カメラから1.93mの位置ある鉛直方向の回転量の影響を受けやすい壁の平面の方向ベクトルと、平面誤差を算出し、Table2 に示す。ここでの方向ベクトルの真値は $(1, 0, 0)$ とし、平面誤差は、推定平面から各点群の距離誤差の標準偏差の値とする。平面推定の対象の点群を Fig.8 に、推定結果である平面領域を Fig.9 に示す。

Fig.7(b) より、室内の3次元点群が Blender のモデルと等しいとみなせるので、提案手法の有効性を示した。しかし、カメラの姿勢推定が既知であるにも関わらず、方向ベクトルが $(1.00, 6.20 \times 10^{-3}, -0.54 \times 10^{-3})$ となり、平面誤差の値が 23.4mm となった。既知の回転量の場合で誤差が生じた原因は、正距円筒画像の歪みであると考えられる。正距円筒画像は周囲360°の情報を二次元画像に展開した画像であるため、Fig.2の床や天井などの上下部が引き伸ばされて投影される。レーザー照射領域を正距円筒画像上で投影した場合でも同様であるため、レーザーの重み付き重心位置の計算に影響を与えている可能性がある。

また、回転量が既知の場合と回転量を推定した場合の結果を比較すると、後者の方が方向ベクトルの誤差値と平面誤差の値が大きい。原因としては、正距円筒画像の歪みの影響に加えてカメラの姿勢推定の誤差が起因していると考察できる。



(a) 既知の回転量

(b) 推定された回転量

Fig.7. 室内全体の3次元点群

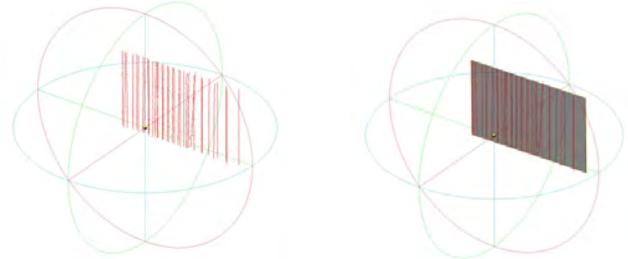


Fig.8. 平面推定の対象点群

Fig.9. 推定された平面

Table2: 平面推定の結果

Rotation	Normal vector	Planar deviation
True	$(1.00, 6.20 \times 10^{-3}, -0.54 \times 10^{-3})$	23.4 [mm]
Estimation	$(1.00, 8.13 \times 10^{-3}, -1.51 \times 10^{-3})$	39.9 [mm]

4 結言

本研究では、全天球カメラと円周レーザーを用いた屋内環境の3次元計測の手法を提案した。直線特徴量に基づくカメラの姿勢推定を行うことで、テクスチャレスな空間でも複数のレーザー点群を融合することができる。今後は、Canny法も組み合わせた直線検出方法の改善や、実環境での精度評価を目標とする。

参考文献

- [1] M. Kawata, H. Higuchi, S. Pathak, A. Yamashita and H. Asama, "Scale Optimization of Structure from Motion for Structured Light-based All-round 3D Measurement," 2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Melbourne, Australia, 2021, pp. 442-449, doi: 10.1109/SMC52423.2021.9658793.
- [2] The Manhattan World Assumption: Regularities in Scene Statistics which Enable Bayesian Inference, J. Coughlan, A. Yuille Published in NIPS 2000 Computer Science.
- [3] ULSD: Unified Line Segment Detection across Pinhole, Fisheye, and Spherical Cameras, Hao Li, Huai Yu, Wen Yang, Lei Yu and Sebastian Scherer, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Volume 178, August 2021, Pages 187-20.
- [4] Tsubasa Goto, Sarthak Pathak, Yonghoon Ji, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: "Line-based Global Localization of a Spherical Camera in Manhattan Worlds", Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2018), pp. 2296-2303, Brisbane (Australia), May 2018.
- [5] <https://www.blender.org/download/demo-files/cycles>