

環境 3 次元レーザ計測支援のための 点群重畳表示に関する研究

北海道大学工学部 ○大野健太, 北海道大学大学院情報科学研究院 ◎伊達宏昭, 金井理

要 旨

本研究は、環境の 3 次元レーザ計測支援のための実環境への点群重畳表示法の開発を目的とする。本報では、計測作業者がカメラ画像を通して計測済みの点群や未計測部をリアルタイムに確認することを可能にするための、カメラ画像と点群から生成した画像間のマッチングによる点群中の自己位置・姿勢推定手法、およびカメラ画像上への計測済み点群・未計測部の重畳表示法について提案する。

1. はじめに

近年、据え置き型レーザスキャナ (TLS: Terrestrial Laser Scanner) を用いて取得される環境 3 次元計測データは、プラント、土木建築、法廷問題、エンターテイメント、文化財などの幅広い分野で用いられている。TLS での 3 次元計測では図 1 に示す点群と呼ばれる点集合のデータを取得することができるが、図 2 のように TLS の設置位置から物体の遮蔽による不可視の部分で未計測の領域が発生するため、計測は複数の箇所から行われる。3 次元計測では、計測対象の重要な箇所の遮蔽による計測漏れがなく、質の高い (高い点密度など) 点群が取得できていることが重要である。

現状、計測点群の確認作業はモニター上に表示した点群と実環境を比較して行うため非効率的であり、現場での確認作業の時間が取れないような公共施設やプラントなどの計測では即座の確認作業を行うことができない。そこで計測漏れなく、十分な点群の品質を担保するため多くの箇所から過剰な計測を行い、現場を離れた箇所での確認作業を行う場合があるが、データ量が膨大となりデータのハンドリングコストが高まる。一方で、重要な箇所を精度良く少ない回数で計測するための最適スキャナ配置位置推定に関する研究[1]が行われているが、事前知識として簡易 3 次元モデルが必要、推定された目標位置にスキャナを厳密に設置することが難しいという問題がある。

そこで本研究では、TLS による 3 次元計測を対象として、現場における計測データの即座かつ直感的な確認による計測作業支援を目的とした、実環境への点群重畳表示を行うシステムの開発を目的とする。本システムでは、計測済みの点群や未計測部を、実環境を撮影したカメラ画像に重畳表示し、計測作業者に未計測箇所や点群の情報を提示する。図 3(a)に点群重畳表示システムの概要を示す。タブレット PC などのカメラセンサから取得される画像と点群から取得された画像とのマッチングを通して点群空間上での現在の自己位置姿勢を推定する。その後、点群空間上の自己位置姿勢から点群情報を取得しカメラ画像上に重畳する。これにより現場での計測漏れの確認や点群の品質を計測作業者が直感的かつ迅速にカメラ画像を介して確認できるようになり、適切な再計測の実施や点群の品質を担保することが可能となる。

2. 提案する点群重畳表示手法

2.1 概要

本研究で開発した点群重畳表示法の処理の流れを図 3(b)に示す。本研究では点群から生成した画像 (以降、点群画像と呼ぶ) を用いて自己位置姿勢推定、ならびに点群や未計測部の重畳表示を行う。点群空間内での自己位置姿勢推定は黒部らの手法[1]を参考に行った。まずカメラ画像と類似した点群画像を生成するために、前処理としてカメラキャリブレーションによりカメラの内部パラメータを求める。本手法では、チェッカーボードを用いて Zhang[2]らの手法によりキャリブレーションを行った。次に求めた内部パラメータを用いて点群画像を生成する (図 3①)。そして点群画像とカメラ画像間の対応を抽出する (図 3②)。その後、カメラの点群内での自己位置姿勢を推定する (図 3③)。最後に、推定した自己位置姿勢から点群や未計測部の情報を取得し、カメラ画像上に重畳する (図 3④)。以下では①～④の詳細について説明する。

2.2 点群画像生成

キャリブレーションによって取得したカメラパラメータを使用し、点群空間内の視野錐台を定義し、透視投影により色付き点群から

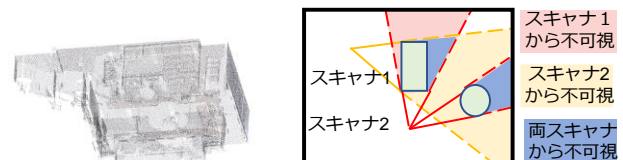


図 1 TLS での計測点群 図 2 遮蔽による計測漏れの発生

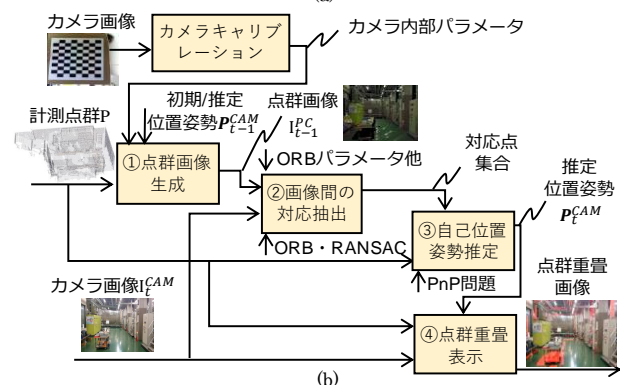
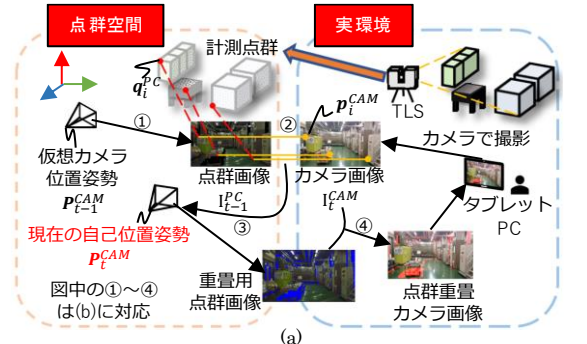


図 3 本手法の概要

RGB 画像を点群画像として生成する。点群画像生成のための仮想カメラ位置姿勢の初期値はユーザによる正解位置姿勢に近いものを入力とする。以降の処理で位置姿勢が推定された後は、推定した位置姿勢を仮想カメラの撮影位置に用いる。

2.3 自己位置姿勢推定

本手法では、時刻 t に取得したカメラ画像 I_t^{CAM} に点群や未計測情報を重畳するために、 I_t^{CAM} を取得したカメラの点群空間中の位置姿勢 p_t^{CAM} を求める必要がある。そのためにカメラ画像中の複数の特徴点 $\{p_i^{CAM} \in R^2\}$ に対応する点群空間中の 3 次元座標 $\{q_i^{PC} \in R^3\}$ を求める。点群画像中の特徴点は点群中の点と対応しているため、カメラ画像 I_t^{CAM} と前フレームのカメラ位置から取得した点群画像 I_{t-1}^{PC} との対応を求めることにより、 p_t^{CAM} に対応する q_i^{PC} を求めることができる (図 3)。本研究では重畳表示のリアルタイム性を高めるため ORB 特徴[3]を用いて画像間の対応集合を取得する。ORB は FAST 特徴検出器と回転不変性を導入した BRIEF 特徴記述子によって構成されており、高速な対応検出処理が可能である。しかし I_{t-1}^{PC} には、オクルージョンによる未計測箇所や点の疎な箇所によ

る画像の色情報の欠損の影響によって特徴点が集中し、誤対応が多く含まれる場合がある。

そこで I_t^{PC} 中に誤対応を多く生じるような局所的な色情報欠損部が存在する場合でも、その箇所に依存せずに一様に特徴点を検出するため、図4のように入力画像を n 分割し(本研究では $n=4$ で実装)、分割画像ごとにORBによる対応抽出を行う。また処理効率、精度を上げるため、BRIEF特徴記述子による特徴量距離の小さい上位 m 点を抽出する。その後、各画像を統合し、RANSAC[4]により有効な対応点を選択する。そして、取得したカメラ画像中の対応点 p_i^{CAM} を、点群画像 I_t^{PC} 中の対応点を用いて2.2節の逆変換を実施することにより、 p_i^{CAM} に対応する点群空間中の3次元座標 q_i^{PC} を算出する。最後に、 p_i^{CAM} と q_i^{PC} 間の対応を用いてPnP問題[6]を解くことで時刻 t におけるカメラ画像の点群内での自己位置姿勢 P_t^{CAM} を決定する。

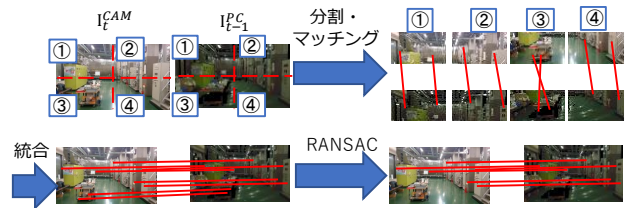


図4 画像分割を用いた対応点検出

表1 実験に用いたORBパラメータ

最大特徴点検出数	対応点抽出数	ピラミッドレイヤ数	縮小率	バッチサイズ
5000	100	8	1.4	31

2.4 点群重畳表示

2.3節により推定された自己位置・姿勢を用いて、点群から重畳用画像を生成し、カメラ画像上へ重畳する。本システムでは以下の2つの機能を実装した。

【未計測部の重畳表示】

点群の未計測箇所をカメラ画像上に表示させる。このために求めたカメラ位置姿勢を用いて点群から背景色の画素値を実環境のカメラ画像上に現れにくい特定の値(本研究では(R,G,B)=(0,0,255))を利用して重畳用点群画像を生成する。生成した画像の中から、点群の背景色の画素に対応するカメラ画像上の画素値を変更(本研究ではR値を255に変更)することでカメラ画像上に未計測箇所を表示する。

【点群情報の重畳表示】

点群の品質情報(点密度、スキャナからの距離やレーザ入射角など)をカメラ画像上に重畳して表示を行う。まず点群の各点にその品質に応じた色を割り当て、点群から重畳用点群画像を生成する。生成した画像の中から点群の背景色の画素に対応しないカメラ画像上の画素値を、重畳用点群画像の画素値に変更することでカメラ画像上に点群の品質情報を表示する。

3. 提案手法の適用結果および評価

ある熱源機械室を対象に提案手法の評価実験を行った。入力点群は、FARO Focus 3D S120により1カ所から計測して取得したもの(約1千万点)を用いた。入力画像は、Surface pro 3のリアカメラ(解像度640×360px, 30fps)で撮影した動画の2フレームごとの画像を用いた。自己位置姿勢推定と重畳処理はOS:Win10, Core: i7-3770K, RAM:32GBでの計算機上で実行した。また画像間の対応抽出と自己位置姿勢推定にはOpenCVを使用し、ORBによるマッチングを行う際のパラメータは実験的に表1に示す値に決定した。カメラは、スキャナ設置位置に近い場所で、高さや視線の方向を大きく変化させずに6秒で3m直線移動させた。仮想カメラの初期位置姿勢は手入力した。

図5に、2カ所におけるカメラ画像、推定した位置姿勢から生成した点群画像、ならびに未計測領域と点群の品質(レーザ入射角)を重畳表示した結果を示す。結果より、実環境の撮影画像を通して、未計測部や計測点群の品質を確認できることがわかる。また本システムで推定した自己位置姿勢(図6(a))の誤差評価を行った。誤差の基準となる位置姿勢は、高い精度で自己位置姿勢が推定できると予想される対応点を手動で選択してPnP問題を適用して求めた。基準位置姿勢に対する誤差を図6(b)(c)および表2に示す。距離の絶対平均誤差0.1419m, 最大誤差0.2980m, 姿勢の最大誤差1°以内であり実用上十分な精度で推定が行えていることが確認できた。また表3に1フレーム当たりの平均処理時間を示す。本実装では約10fpsでの処理が可能であった。

4. おわりに

本報では、実環境を撮影したカメラ画像へのレーザ計測点群や未計測箇所の重畳表示手法を提案し、実験によりその有効性を確認した。今後は様々な環境での性能評価を行う。

参考文献

[1] 黒部他, 道路周辺の3次元点群データと車載カメラ画像を用いた車両の軌跡推定手法, 精密工学会誌, 85(3), 274-281 (2019)
 [2] 脇坂他, 空調設備のas-builtモデル構築のための地上型レーザスキャナの最適配置計画, 精密工学会誌, 84(8), 738-745 (2018)
 [3] Z. Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11), 1330-1334 (2000)
 [4] E. Rublee et al., ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF, Proc. 2011 IEEE International Conference on Computer Vision, 2564-2571 (2011)

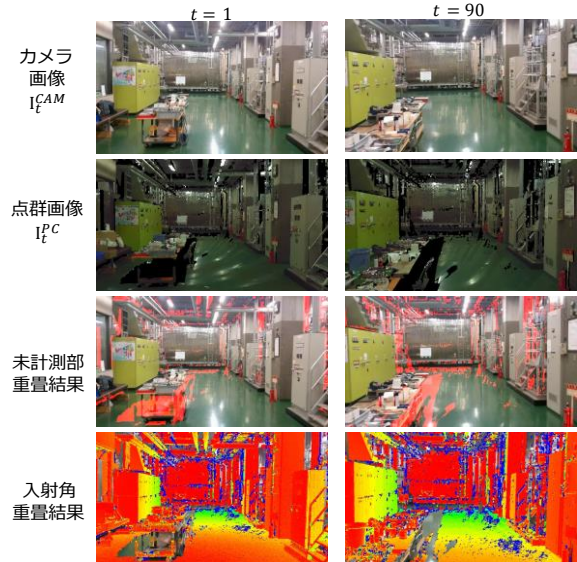


図5 点群重畳表示結果

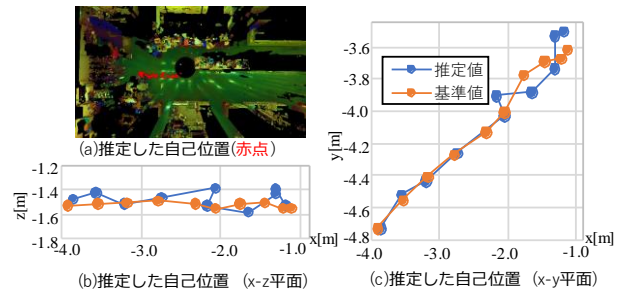


図6 推定した自己位置

表2 自己位置姿勢の誤差評価

軸	位置[mm]				姿勢[°]
	X	Y	Z	距離	
平均誤差	94.0	69.0	61.8	142.0	0.23
最大誤差	252.8	132.4	155.2	298.1	0.89
標準偏差	62.1	45.5	45.1	72.4	0.23

表3 1フレーム当たりの各処理の処理時間[ms]

対応抽出	自己位置姿勢推定	点群重畳表示	合計時間
26.2	53.4	17.4	100.3

[5] M.A. Fischler et al., Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Communications of the ACM, 24(6), 381-395 (1981)
 [6] R. Hartley et al., Multiple View Geometry, 2ndEdition, Cambridge University Press, (2004)