

トータルステーションを用いたカメラ-LiDARの キャリブレーション手法

野路 晃太郎*¹ 上瀧 剛*¹
熊本大学*¹

高精度 3D 地図は複数センサを搭載した計測車両により作成される。センサデータ統合では 1 枚の校正ボードを複数センサで同時計測して校正する。しかし、計測車両によっては複数センサの計測範囲に重複が無いケースがあり、この方法が使えない。そこで、本研究では同一の作りで相対位置が既知の 2 枚のボードを用いることで、計測範囲に重複がないカメラと LiDAR を疑似的に重複させる方法を提案する。ボード間の相対位置はトータルステーションで計測する。実環境で画像と 3D 情報が高精度に重ね合わせ可能であることを示す。

Extrinsic Calibration Method for Camera-LiDAR using Total Station

Kotaro Noji*¹ Gou Koutaki*¹
Kumamoto University*¹

Abstract High-definition maps are produced by a measurement vehicle equipped with multiple sensors. In data fusion, calibration is performed by simultaneously measuring a single calibration board with multiple sensors. However, this method can't be used for measurement vehicles that don't overlap in the measurement range of multiple sensors. In this study, we propose a method of pseudo-overlapping camera and LiDAR, which don't overlap in measurement range, by using two boards of the same structure with known relative positions. The relative position between the boards is measured by a total station. We show that accurate calibration is possible in a real environment.

Keyword: Camera-LiDAR Calibration, TS: Total Station, MMS: Mobile Mapping System

1. はじめに

自動車運転は、車両に搭載した複数のセンサで周囲環境を認識し、3D 地図と照合することによって運転操作を高精度に制御している。そのため、詳細な環境認識と同様に 3D 地図の高精度化も自動運転の実現課題の 1 つとされている。

その高精度 3D 地図は、車両に複数のセンサを搭載した MMS (Mobile Mapping System) で実際に道路を走行し、収集したデータを用いて作成する手法が主流である。MMS に搭載されるセンサの中でも、カメラから得られる色、質感、外観などの情報や、LiDAR (Light Detection and Ranging) から得られる 3D 構造の情報が地図データにおいて重要である。これらの情報を統合することによって詳細な情報を持つ 3D 地図

を作成することができる。センサデータを統合するには、外部キャリブレーションによってセンサ間の外部パラメータを推定し、データの位置合わせを行う。一般的なカメラと LiDAR の外部キャリブレーションのフレームワークは、両センサデータから 2D-3D の対応関係を抽出し、その対応関係が一致するように外部パラメータを最適化する。カメラと LiDAR の外部キャリブレーションについては多くの研究がなされており、一般的にターゲットベース手法とターゲットレス手法に大別される¹⁾。

ターゲットベース手法は、サイズが既知のターゲットの計測データから対応関係を生成する手法である。この手法は、高精度なキャリブレーション結果が得られるが、対応関係を生成するためにターゲットを移動させながら複数回の計測を行う必要がある。



Fig.1 SOKKIA CX-105F (測距距離：1.3～4,000m, 測距精度： $\pm(2+2\text{ppm}\times D)\text{mm}$, 測角精度：5")

一方でターゲットレス手法は、特定のターゲットを用いずに一般環境に存在する特徴点の対応関係を直接解く手法である。この手法はどの環境でもリアルタイムにキャリブレーションが可能であるが、ターゲットベースほどの精度は期待できない。

両手法には一長一短があり、目的や用途に応じて選択される。しかし、両手法とも対応関係の生成が必要であるため、カメラと LiDAR の計測範囲が重複することに依存していることがほとんどである。そのため、カメラと LiDAR の計測範囲が重複しない場合に適用することができない。

本稿では、カメラと LiDAR の計測範囲が重複しないように配置されている MMS を対象に、高精度でロバストなターゲットベースの外部キャリブレーション手法を提案する。本手法の概要は以下の通りである。まず、カメラと LiDAR の計測範囲内にチェスボードを1枚ずつ設置し、対応関係のない画像と点群を取得する。次に、トータルステーション (TS) (図1) を用いて2枚のチェスボード間の相対位置を計測する。TSは、光波距離計とセオドライトを組み合わせた測量機であり、mm単位の測距と秒単位の測角を行うことができる。そして、2枚のチェスボード間の相対位置を用いることによって、チェスボードの点群をもう一方のチェスボードに対応する点群に変換する。この前処理によって、疑似的に同一ターゲットを計測した画像と点群のペアが用意できる。最後に、このデータセットを用いて外部キャリブレーションを行う。この提案手法は以下の特性を有している。

- 本稿の主な貢献は、カメラと LiDAR で疑似的に同一ターゲットを計測できる点であり、使用するターゲットや外部キャリブレーション手法は既存のものを選択することができるため拡張性が高い。
- 計測範囲が重複する範囲内にターゲットを設置するという制約がなく、自由度の高いターゲットの設置が可能である。
- キャリブレーションに用いるデータセットを計測する際、センサの移動が不要であるため、屋内で環境条件にロバストな計測が可能である。
- キャリブレーションに用いる点群のデータセットは、1つの点群を変換して作成されるため LiDAR によ

る複数回の計測は必要ない。また、好条件で計測した点群を変換することによって、本来の LiDAR 計測による点群よりも良い点群を用意できる。

2. 関連研究

本稿では、MMS 上の計測範囲が重複しないカメラと LiDAR を対象にターゲットベースの外部キャリブレーションを行う。そのため、関連研究はターゲットベースの外部キャリブレーション手法と計測範囲が重複しない外部キャリブレーションに大別される。

2.1 ターゲットベースの外部キャリブレーション手法

ターゲットベースの外部キャリブレーションは長年にわたり研究されてきており、中でもチェスボードは様々なレーザースキャナとカメラの外部キャリブレーションに用いられている。

Zhang と Pless²⁾ は、2D レーザースキャナと単眼カメラの外部キャリブレーションに初めてチェスボードを導入した。この手法は、チェスボードを計測した点群は画像に写るチェスボードから推定されるボード平面上の点であるという対応関係を使用している。この対応関係を解くには少なくとも6つの位置・姿勢 (ポーズ) で設置したチェスボードを捉えたデータセットが必要であるが、ポーズ数が多いほどキャリブレーション精度が上がる言及されている。

Unnikrishnan と Hebert³⁾ は、Zhang と Pless の手法²⁾ を 3D レーザースキャナと単眼カメラに拡張した手法を提案し、Pandey ら⁴⁾ は、3D レーザースキャナと全方位カメラに拡張した。

また、平面の対応以外の対応を追加する手法もある。Zhou ら⁵⁾ は、チェスボード平面の対応関係に加え、ボード四辺の対応関係も使用しており、1つのポーズでキャリブレーションを行うことができる。Verma ら⁶⁾ は、ボード四辺の検出は誤差が生じやすいことから、チェスボードの平面の対応関係に加え、ボードの中心点の対応関係を用いている。

さらに、ボードに円や三角形などの穴を開けることで点群からもボード平面上のパターンを検出する手法もある^{9, 10, 11)}。Xie ら¹²⁾ は、ボードに複数個の穴を開け、穴の位置に応じてボードを符号化して管理することで、穴の誤検出を回避している。

そして、Geiger ら⁷⁾ は、複数のチェスボードを設置することで1回の計測で複数の対応関係を獲得している。Cano ら⁸⁾ は、複数のチェスボードの配置を最適化するガイドラインを定義し、最後に3D点群を画像に投影することでガイドラインの有用性を示した。

2.2 計測範囲が重複しない外部キャリブレーション

従来の外部キャリブレーション手法の多くは、キャリブレーション対象である両センサ間の計測範囲が重複することを前提としている。そのため、MMS のような計測範囲が重複しないセンサ間のキャリブレーションにそのまま適用することができない。そこで、そのような場合に対応できる外部キャリブレーション手法がいくつか考案されている。

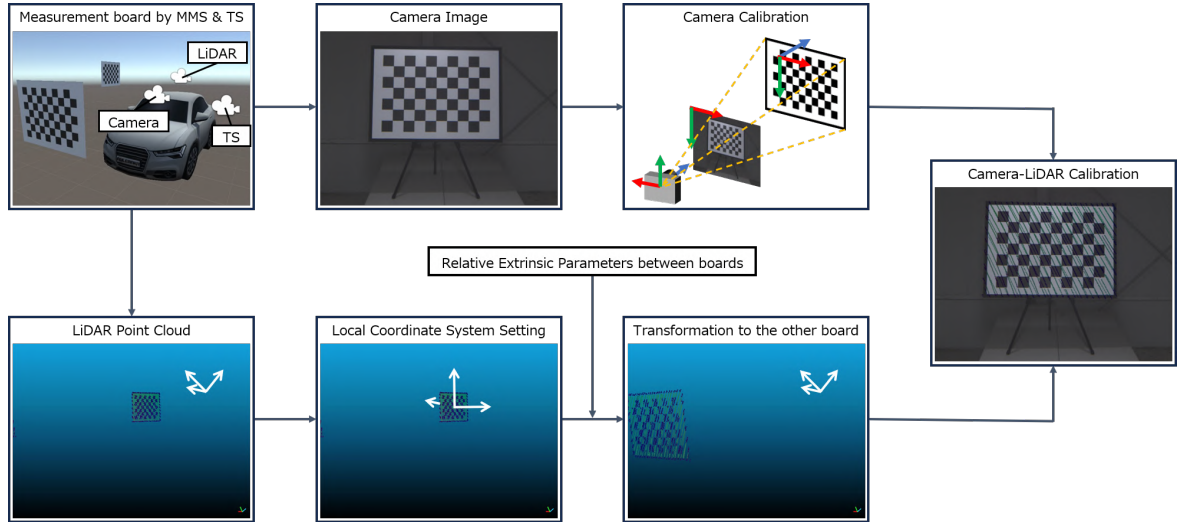


Fig.2 提案手法の概要. まず, MMS 上のカメラおよび LiDAR でチェスボードを計測する. 次に, 画像に対してカメラキャリブレーションを行う. 点群に対しては局所座標系を設定および座標系変換を行い, TS で取得したボード間の相対位置を用いてチェッカーボード点群をもう一方のチェスボード点群に変換する. 最後に同一のチェッカーボードの画像と点群データで外部キャリブレーションを行う.

Xia ら¹³⁾ は, 計測範囲が重複しないカメラ間のキャリブレーションに焦点を当て, 従来手法を6つのカテゴリに分類した. 彼らの調査によると, セオドライトやレーザートラッカー等の長距離計測機を介してキャリブレーションを行う手法が精度が高く, 広範囲に対応していることが示されている. しかし, これらの手法は同一モダリティ間のキャリブレーション手法であるため, 今回のような異なるモダリティ間のキャリブレーションに用いることができない.

Napier ら¹⁴⁾ は, 計測範囲が重複しないカメラとプッシュブルーム型の2D LiDAR のターゲットレスの外部キャリブレーション手法を提案した. この手法は, 両センサが移動プラットフォームに搭載されていることが前提であり, 視覚オドメトリを用いて点群を蓄積することで同じシーンの計測データを用意している. 対応関係にはカメラのエッジ画像と点群の反射強度画像を用いており, これらの計測データは異なる時刻に取得したもので良いことが言及されている.

Jeong ら¹⁵⁾ は, 本稿と同じく MMS の外部キャリブレーション手法を提案した. この手法は Napier ら¹⁴⁾ のアプローチに近いが, 3軸 FOG, IMU およびホイールエンコーダを用いることでより高精度にオドメトリを取得している. また, エッジ画像と反射強度画像の対応に加え, 画素値と反射強度の相関と路面点群と画像から推定される路面の対応も用いている.

Zhang ら¹⁶⁾ は, 計測範囲が重複しないカメラと LiDAR の外部キャリブレーションを屋内で実施した. 屋内環境は GNSS (Global Navigation Satellite System) の信号が届きにくくオクルージョンや光量不足が発生しやすいことから, 高精度にオドメトリを取得することが困難である. そこで, Visual-SLAM で取得したオドメトリを LiDAR-SLAM で取得したオドメトリで補正した後に, 各オドメトリの対応を解いている.

我々が提案する手法では, チェスボードを2枚設置しボード間の相対位置を用いることで同一のターゲットの計測データを疑似的に取得する. そのため, オドメトリの誤差が伝搬することなく, ターゲットベースによって高精度なキャリブレーションが可能である. また, 本手法は様々なターゲットおよび従来の外部キャリブレーション手法^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 7, 8)}を適用することができる.

3. 提案手法

提案手法の概要を図2に示す. まず, MMS 上のカメラおよび LiDAR の計測範囲にチェスボードを1枚ずつ配置し, チェスボードの画像および点群を得る. 画像に対してはカメラキャリブレーションを行う. 点群に対してはチェスボード点群の中心を原点, チェスボードの辺および面に直交する局所座標系を設定する. 詳しい設定方法については3.1節で述べる. そして, 以下の式で座標変換を行う.

$$\mathbf{P}_{LB}^{LB} = \mathbf{R}_{LB}^L \mathbf{P}_{LB}^L + \mathbf{t}_{LB}^L \quad (1)$$

ここで, \mathbf{P}_{LB}^L は LiDAR 座標系における LiDAR 用ボード (LiDAR Board: LB) の点群, \mathbf{P}_{LB}^{LB} は LiDAR 用ボード上に設定した局所座標系における LiDAR 用ボードの点群である. \mathbf{R}_{LB}^L および \mathbf{t}_{LB}^L は LiDAR 用ボード上に定義した局所座標系の原点位置と向きに該当する.

この変換後, TS で取得したボード間の相対位置を用いてもう一方のチェスボードの点群に変換する. この座標変換は以下の式 (2) で表される.

$$\mathbf{P}_{CB}^{LB} = \mathbf{R}_{CB}^{LB} \mathbf{P}_{LB}^{LB} + \mathbf{t}_{CB}^{LB} \quad (2)$$

ここで, \mathbf{P}_{CB}^{LB} は局所座標系におけるカメラ用ボード (Camera Board: CB) の点群である. \mathbf{R}_{CB}^{LB} および \mathbf{t}_{CB}^{LB} はボード間の相対位置に該当する. このボード間の相対位置の取得方法については3.2節で述べる.

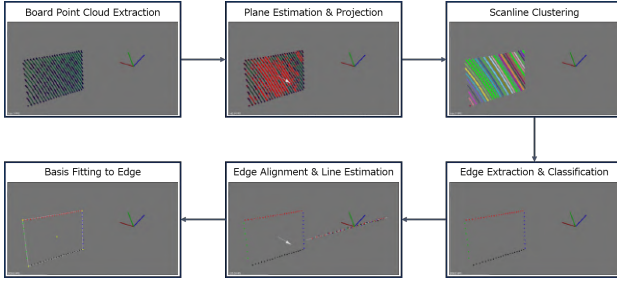


Fig.3 局所座標系の設定のワークフロー

最後に、式 (1) の逆演算によって局所座標系における点群を再度 LiDAR 座標系における点群に戻す。以上の変換によって LiDAR 座標系におけるカメラ用ボード点群が得られ、同一チェスボードの画像と点群が揃う。この計測および変換を複数回行い、キャリブレーションデータセットを作成する。

3.1 局所座標系の設定

局所座標系の設定方法を図 3 に示す。この処理は 6 つの工程から成り、各工程について 1 つずつ説明する。

第 1 に、LiDAR の計測点群からチェスボードの点群を抽出する。この処理はオペレーターが手作業で行う。

第 2 に、チェスボード点群の平面を推定し、点群を平面上に投影する。平面推定には主成分分析 (Principal Component Analysis: PCA) を用いる。PCA による平面推定は、点と平面の距離を最小化することによって単位法線ベクトルを推定する。そのため、ある座標軸方向の残差を最小化する回帰分析に対し、点群のように全ての座標軸方向に同程度の誤差が含まれるデータに適している。推定した単位法線ベクトル \mathbf{n} を局所座標系の 1 つ目の軸とする。

第 3 に、平面に投影した点群に対して、スキャンラインをクラスタとしてクラスタリングを行う。クラスタリングには、クラスタ数が入力時点で不明であることから最近傍 (NN: Nearest Neighbor) 法を利用する。この手法では、異なるクラスターの点の間の最小ユークリッド距離を設定し、各点の近傍点を求めながら閾値を超えた場合に適宜ラベル付けを行う。

第 4 に、各クラスタから端点を求め、チェスボードのどの辺に属するか分類する。この処理もオペレーターが手作業で行う。

第 5 に、四辺に分類したエッジ点群を 1 列に整列し、その点群列を通る直線を推定する。各辺のエッジ点群を整列するには、まず、各辺のエッジ点群ごとにセンタリングを行う。次に、チェスボードの垂直辺 (左辺および右辺) を単位法線ベクトル \mathbf{n} を軸に 90° 回転させ、水平辺に向きを合わせることを考える。この回転行列は、ロドリゲスの回転公式によって求めることができ、以下のようになる。

$$\mathbf{R}(90^\circ) = \begin{bmatrix} n_x^2 & n_x n_y - n_z & n_x n_z + n_y \\ n_y n_x + n_z & n_y^2 & n_y n_z - n_x \\ n_z n_x - n_y & n_z n_y + n_x & n_z^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

最後に、チェスボードの水平辺方向に整列したエッジ点群に対して、直線推定を行う。直線推定には、平面推定と同様の理由で PCA を用いる。推定した単位水平ベクトル \mathbf{h} を局所座標系の 2 つ目の軸とする。局所座標系の残りの 1 軸は、法線ベクトル \mathbf{n} と水平ベクトル \mathbf{h} の外積によって求めることができ、チェスボードの垂直辺に平行な単位垂直ベクトル \mathbf{v} である。

第 6 に、先ほど求めたボードの辺に平行なベクトルを、各辺のエッジ点群にフィッティングする。フィッティングは点と直線の距離の最小化問題である。3次元における直線の式 L および点 \mathbf{P} と直線 L の距離 d の式を以下に示す。

$$L(\mathbf{A}, \mathbf{U}) = \mathbf{A} + t\mathbf{U} \quad (4)$$

$$d(\mathbf{P}, L) = \frac{|\mathbf{U} \times (\mathbf{P} - \mathbf{A})|}{|\mathbf{U}|} \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{A} は直線が通る点、 \mathbf{U} は直線方向ベクトル、 t は直線の媒介変数である。ボードの辺に平行なベクトルを各辺のエッジ点群にフィッティングするため、各直線方向ベクトルは \mathbf{h} または \mathbf{v} である。残る未知のパラメータである各直線が通る点は、チェスボードのサイズが既知であるため、チェスボードの中心座標 \mathbf{o}^l を用いて表すことができる。最終的に、各直線の式は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} L_{top}^l &= \mathbf{o}^l + \frac{height}{2}\mathbf{v} + t\mathbf{h} \\ L_{bottom}^l &= \mathbf{o}^l - \frac{height}{2}\mathbf{v} + t\mathbf{h} \\ L_{left}^l &= \mathbf{o}^l - \frac{width}{2}\mathbf{h} + t\mathbf{v} \\ L_{right}^l &= \mathbf{o}^l + \frac{width}{2}\mathbf{h} + t\mathbf{v} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $width$ および $height$ はチェスボードのサイズである。これら各辺の直線の式およびエッジ点群を式 (5) に代入し、点と直線の距離の平均値 D を求める。式で表すと以下のようになる。

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i(\mathbf{P}_i, L) \quad (7)$$

ここで、 N は任意の辺におけるエッジ点群数である。この式によって各辺のエッジ点群とフィッティング直線の距離 D_{top} , D_{bottom} , D_{left} および D_{right} を求める。そして、これらの合計値が最小となるような \mathbf{o}^l を求める。式で表すと以下のようになる。

$$\min_{\mathbf{o}^l} D_{top} + D_{bottom} + D_{left} + D_{right} \quad (8)$$

ここで、 D は微分可能かつ凸関数であるため、 D の停留点が大域的最適解となる。この解を局所座標系の原点座標とする。

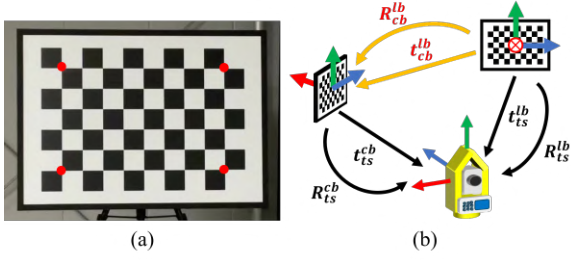


Fig.4 (a) TSによるチェスボード上の計測点. (b) ボード間の相対位置の取得概要.

3.2 ボード間の相対位置の取得

TSによるチェスボード上の計測点を図4(a)に示す. 本手法に必要なパラメータは, ボード間の相対位置 t_{CB}^{LB} , R_{CB}^{LB} である. そのため, 図4(a)に示すように, チェスボードの向きを推定するために3点以上を計測し, ボードの位置を推定するために重心がボードの中心となる4点を計測点に設定している.

ボード間の相対位置の取得の概要を図4(b)に示す. カメラ用ボードの位置姿勢 R_{TS}^{CB} および t_{TS}^{CB} と, LiDAR用ボードの位置姿勢 R_{TS}^{LB} および t_{TS}^{LB} が得られると, ボード間の相対位置は以下の式で計算できる.

$$R_{CB}^{LB} = (R_{TS}^{CB})^{-1} R_{TS}^{LB} \quad (9)$$

$$t_{CB}^{LB} = (R_{TS}^{CB})^{-1} (t_{TS}^{CB} - t_{TS}^{LB}) \quad (10)$$

4. 実験

提案手法をシミュレータおよび実機で実施し, 外部キャリブレーション精度を評価する.

4.1 実験条件

今回のキャリブレーション対象の仕様を表1に示す. ボード間の相対位置の取得には, 図1のTSを用いる. また, 本実験ではチェスボードを1枚だけ用意し, 両センサの計測範囲にて順次計測を行う. これにより, 2枚のボードの個体差を考慮する必要がなくなる.

外部キャリブレーションはZhangの手法²⁾で行う. 2章で述べた通り, ポーズ数が多いほどキャリブレーション精度が上がるため, チェスボードの位置姿勢を変化させて計測を複数回行う. 位置パターンは, カメラ画像を縦および横に3分割した9つとする. 姿勢パターンは, 上下左右と正面向きの5つとする. よって, 計45パターンのポーズを計測する.

4.2 評価指標

シミュレータによる定量評価および実機による定性評価を行う. シミュレータは外部パラメータの真値が既知であるため, 推定値との誤差を評価することができる. 外部パラメータの推定値を (\hat{R}, \hat{t}) , 真値を (R, t) とすると, 並進誤差および回転誤差は以下の式(11)および式(12)で計算される.

$$e_{translation} = \|\hat{t} - t\|_2 \quad (11)$$

$$e_{rotation} = \hat{R}R^{-1} \quad (12)$$

Table 1 LiDAR, カメラおよびレンズの仕様

LiDAR		カメラおよびレンズ	
最大測定距離	100[m]	解像度	4096×3000
測定誤差	±2[cm]	焦点距離	6.5[mm]
垂直/水平視野角	41.33°/360°	撮像素子	IMX253

Table 2 並進の真値と提案手法による推定結果の比較

	t_x [m]	t_y [m]	t_z [m]	Diff. from GT [m]
GT	0.0000	-0.4500	-1.9500	-
Our	0.0005	-0.4540	-1.9398	0.0090

Table 3 回転の真値と提案手法による推定結果の比較

	r_x [deg]	r_y [deg]	r_z [deg]	Diff. from GT [deg]
GT	-150.0000	0.0000	0.0000	-
Our	-150.1303	-0.0038	-0.0899	0.0025

実機の外部パラメータの真値は不明であるため, 外部パラメータの推定値を用いてチェスボード点群およびMMSで収集した路面データの点群を画像に投影させ, 重畳の正確さを評価する.

4.3 定量結果

シミュレータによる外部キャリブレーション結果を表2および表3に示す. 表2および表3より, 並進と回転ともに真値との誤差が非常に小さく, 外部キャリブレーション結果が高精度であることが確認できる.

4.4 定性結果

実機の外部パラメータ推定値を用いて点群を画像に投影させた結果を図5および図6に示す. ここで, 図5および図6は, すべての位置および姿勢パターンの投影結果を1枚に合成した図であることに注意する. 図5および図6より, すべての位置および姿勢パターンで点群を正確に投影されており, 外部キャリブレーション結果が高精度であることが確認できる.

次に路面データの投影結果を図7に示す. 図7より, 路面標示や地物の点群が画像上に正確に投影されており, 提案手法によって高精度にデータ統合が行われていることが確認できる.

5. まとめ

自動運転には高精度な3D地図が必要であり, 3D地図はMMSによって作成される. MMSは事前に外部キャリブレーションを行う必要があるが, カメラとLiDARは計測範囲が重複しない配置の場合の従来手法は, オドメトリの誤差が伝搬するという問題がある. そこで本研究では, チェスボードを2枚用意し, TSで取得したボード間の相対位置を用いることによって疑似的に同一のターゲットを計測する手法を提案した. 提案手法によるデータセットで外部キャリブレーションおよびデータ統合を高精度に行うことができた.

6. 謝辞

本研究の実施にあたり資料のご提供および有益なご助言を戴いた株式会社ゼンリン廣尾啓様, 野口修平様をはじめ, 研究開発室の皆様にご感謝申し上げます.

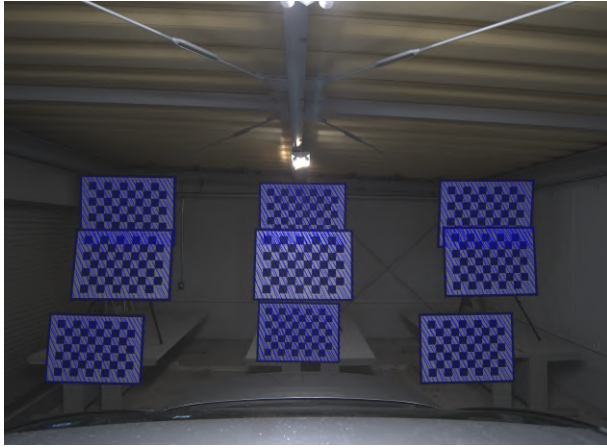


Fig.5 9つの位置パターンの点群投影結果の合成画像

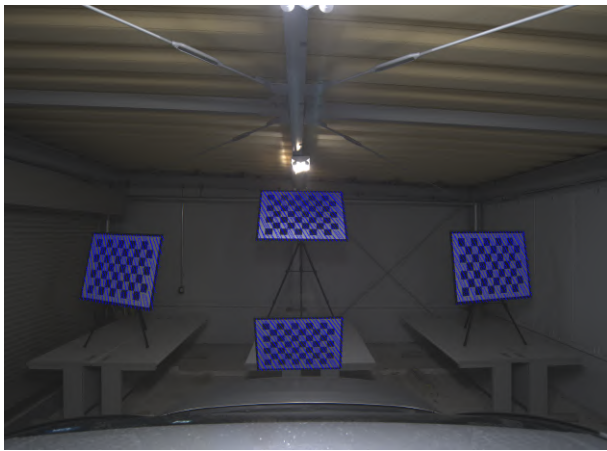


Fig.6 正面向き以外の姿勢パターンの点群投影結果の合成画像



Fig.7 MMS で収集した路面データの点群投影結果

参考文献

- 1) Balázs Nagy, Levente Kovács, and Csaba Benedek. Online targetless end-to-end camera-lidar self-calibration. In 16th International Conference on Machine Vision Applications, MVA 2019, Tokyo, Japan, May 27-31, 2019, pp. 1-6. IEEE, 2019.
- 2) Qilong Zhang and Robert Pless. Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera cali-

- bration). In 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, September 28 - October 2, 2004, pp. 2301-2306. IEEE, 2004.
- 3) Ranjith Unnikrishnan and Martial Hebert. Fast extrinsic calibration of a laser rangefinder to a camera. Technical Report CMU-RI-TR-05-09, Carnegie Mellon University, 2005.
- 4) Silvio Savarese Gaurav Pandey, James McBride and Ryan Eustice. Extrinsic calibration of a 3d laser scanner and an omnidirectional camera. In IFAC Proceedings Volumes, 43(16), 336-341., pp. 336-341. IFAC Proceedings Volumes, 2010.
- 5) Lipu Zhou, Zimo Li, and Michael Kaess. Automatic extrinsic calibration of a camera and a 3d lidar using line and plane correspondences. In 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2018, Madrid, Spain, October 1-5, 2018, pp. 5562-5569. IEEE, 2018.
- 6) Surabhi Verma, Julie Stephany Berrio, Stewart Worrall, and Eduardo M. Nebot. Automatic extrinsic calibration between a camera and a 3d lidar using 3d point and plane correspondences. In 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC 2019, Auckland, New Zealand, October 27-30, 2019, pp. 3906-3912. IEEE, 2019.
- 7) Andreas Geiger, Frank Moosmann, Omer Car, and Bernhard Schuster. Automatic camera and range sensor calibration using a single shot. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2012, 14-18 May, 2012, St. Paul, Minnesota, USA, pp. 3936-3943. IEEE, 2012.
- 8) Abraham Monrroy Cano, Jacob Lambert, Masato Edahiro, and Shinpei Kato. Single-shot intrinsic calibration for autonomous driving applications. *Sensors*, Vol. 22, No. 5, p. 2067, 2022.
- 9) Jong-Eun Ha. Extrinsic calibration of a camera and laser range finder using a new calibration structure of a plane with a triangular hole. Vol. 10, No. 6, pp. 1240-1244, 2012.
- 10) Velas M., Spanel M., Materna Z. and Herout A. Calibration of rgb camera with velodyne lidar. Vol. 10, No. 6, pp. 135-144, 2014.
- 11) Arturo de la Escalera Jorge Beltrán, Carlos Guindel and Fernando García. Automatic extrinsic calibration method for lidar and camera sensor setups. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Vol. 23, No. 10, pp. 17677-17689, 2022.
- 12) Yusen Xie, Lei Deng, Ting Sun, Yeyu Fu, Jian Li, Xinglong Cui, Hanxi Yin, Shuixin Deng, Junwei Xiao, and Baohua Chen. A4lidartag: Depth-based fiducial marker for extrinsic calibration of solid-state lidar and camera. *IEEE Robotics Autom. Lett.*, Vol. 7, No. 3, pp. 6487-6494, 2022.
- 13) Xia R., Hu M., Zhao J., Chen S., Chen Y., and Fu S. Global calibration of non-overlapping cameras: State of the art. *Optik*, Vol. 158, pp. 951-961, 2018
- 14) Ashley Napier, Peter Corke, and Paul Newman. Cross-calibration of push-broom 2d lidars and cameras in natural scenes. In 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany, May 6-10, pp. 3679-3684. IEEE, 2013.
- 15) Jinyong Jeong, Younghun Cho, and Ayoung Kim. The road is enough! extrinsic calibration of non-overlapping stereo camera and lidar using road information. *IEEE Robotics Autom. Lett.*, Vol. 4, No. 3, pp. 2831-2838, 2019.
- 16) Dedong Zhang, Lingfei Ma, Zheng Gong, Weikai Tan, John S. Zelek, and Jonathan Li. An overlap-free calibration method for lidar-camera platforms based on environmental perception. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 72, pp. 1-7, 2023.