

# レーザーレーダと複数のカメラを用いた任意視点映像提示システムの センサキャリブレーション

○岩滝 宗一郎 †, 淵田 正隆 †, アレッサンドロ モロ †, ‡, 野田 隆司 §,  
矢津田 修 §, 中沢 浩一 §, 吉灘 裕 ¶, 山下 淳 †, 浅間 一 †

○ Soichiro IWATAKI †, Masataka FUCHIDA †, Alessandro MORO †, ‡, Takashi NODA §,  
Osamu YATSUDA §, Koichi NAKAZAWA §, Hiroshi YOSHINADA ¶, Atsushi YAMASHITA †  
and Hajime ASAMA †

†: 東京大学, iwataki@robot.t.u-tokyo.ac.jp

‡: (有) ライテックス

§: (株) 小松製作所

¶: 大阪大学

<要約> ロボット遠隔操作のためのレーザーレーダと複数の魚眼カメラを用いた任意視点映像提示システムでは、機体に対する各センサの位置姿勢を推定する必要がある。本研究では、機体形状と平板2枚をキャリブレーション用オブジェクトとして用いることで、現場で容易に実施可能なセンサキャリブレーション手法を提案する。提案手法を実機実験に適用し、機体形状、レーザーレーダによる3Dメッシュとカメラ映像によるテクスチャの位置ずれの少ない提示映像が得られた。

<キーワード> 魚眼カメラ, レーザレーダ, 外部パラメータ

## 1 背景

現在、遠隔操作のための映像提示技術の重要性が高まっている。その中でも、筆者らは、遠隔操作対象のロボットや建設機械にレーザーレーダと複数のカメラを搭載し、それらから得られた3次元計測点と画像を用いて、遠隔操作対象物とその周囲の状況をあたかも環境中のカメラで撮影したような映像を提示するシステムをこれまでに提案している [1]。このシステムでは、あらかじめ定義された機体形状を表現した3次元メッシュと、レーザーレーダの点群データから生成した周囲環境の形状を表現した3次元メッシュ上に、魚眼カメラから得られた映像を合成することで映像を生成している。このシステムでは、各センサから得られた情報を合成して俯瞰映像を生成するためには、各センサ間の相対位置並びに、機体に対するセンサの位置姿勢が既知であることが必要である。しかし、実際の現場で既存の機体にセンサを取り付ける場合には、取り付け

誤差によって、各センサの位置姿勢が設計時の位置姿勢とは異なる場合がある。そのため、センサを機体に取り付けたあとに、各センサの相対位置を推定する必要がある。

従来、レーザーレーダとカメラの相対位置を推定する手法として、様々な手法が提案されている [2-4]。ZhangらやZhouは、2次元レーザーレーダとカメラの相対位置を推定する手法として、チェッカーボードをキャリブレーションターゲットとして用いることで得られる、カメラ映像中のキャリブレーションパターンとレーザーレーダ計測点の直線の対応関係を用いる方法を提案している [2,3]。また、Liらはキャリブレーションターゲットとして矢印型の輪郭をした平板を用いたキャリブレーション手法を提案している [4]。しかし、これらの手法では、想定しているカメラは通常の透視投影モデルであり、魚眼カメラへの適用は想定されていない。また、キャリブレーションにはキャリブレーションターゲットの位置姿勢を様々に変化させて複数回の計測を実施す

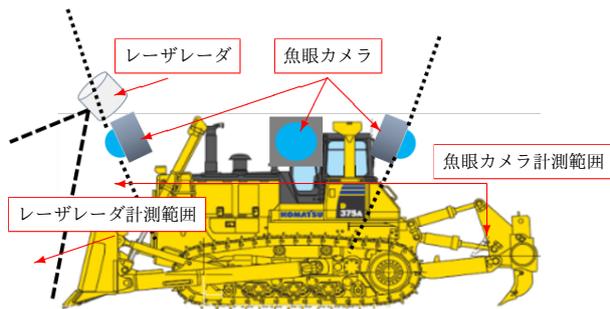


図 1 想定するシステム

る必要があり、キャリブレーション作業が煩雑である。

そこで、本研究では、魚眼カメラとレーザーレーダから構成されるセンサシステムの簡便に実施可能なキャリブレーション手法を提案する。

## 2 キャリブレーション手法

### 2.1 キャリブレーション手法の概要

本提案手法が対象とするシステムは、遠隔操作対象の機体に、レーザーレーダと複数の魚眼カメラが搭載された、図 1 に示すようなシステムである。図には点線で魚眼カメラの計測範囲を図示してあり、各魚眼カメラは機体の一部を撮影できるような位置姿勢で取り付けられていることを表している。また、破線でレーザーレーダの計測範囲を図示しており、レーザーレーダは機体をその計測範囲に含んでいないような位置姿勢で機体に固定されていることを表している。そして、魚眼カメラとレーザーレーダは共通の計測範囲を持つ。本提案手法は、このような状況で、機体に対する各魚眼カメラの位置姿勢と、レーザーレーダの位置姿勢を求める、すなわちキャリブレーションを行うための手法である。

簡便なキャリブレーションを実現するために、機体の形状データを可能な限り活用し、機体形状データで対応できない部分については、容易に入手可能なキャリブレーションオブジェクトを用いる。具体的には、魚眼カメラは機体の一部を撮影できる位置姿勢で搭載されているので、カメラの位置姿勢推定には、カメラに映り込む機体の像と、予め与えられた機体形状データの対応関係を用いる。このとき用いる機体の形状データとは、機体の形状を多数の 3 角形で表現した 3 次元メッシュデータである。そして、機体を計測できない姿勢で搭載されたレーザーレーダの位置姿勢推定には、外部に設置したキャリブレーションオブジェクトを用いる。

ここで、外部に設置したキャリブレーションオブジェクトの機体に対する位置姿勢はキャリブレーション開始時には未知であるので、キャリブレーションオブジェクトの機体に対する位置姿勢をキャリブレーションを行っている途中に求める必要がある。そのために、魚眼カメラは機体の一部を撮影できる位置姿勢で搭載されており、またレーザーレーダの計測範囲と魚眼カメラの計測範囲には共通の計測範囲が存在しているので、魚眼カメラはキャリブレーションオブジェクトを撮影できるという条件を用いる。その条件を用いると、提案するキャリブレーション手法を 3 段階の操作で実現することができる。

1 段階目は機体に対するカメラ位置姿勢推定であり、これは魚眼カメラが機体の一部を撮影しているので、機体の形状データを用いてキャリブレーションを実施する。2 段階目がキャリブレーションオブジェクトの機体に対する位置姿勢推定である。カメラ映像中のキャリブレーションオブジェクトの像を用いて、機体に対するキャリブレーションオブジェクトの位置姿勢を求める。3 段階目がレーザーレーダの位置姿勢推定である。

### 2.2 機体に対するカメラ位置姿勢推定

まず各魚眼カメラの機体に対する位置姿勢を求める。ここでは、各カメラは機体の一部を撮影するような配置で搭載されているので、前述の通り、機体の形状データと、実際のカメラ映像中の機体の像の対応関係を用いてカメラの位置姿勢を推定する。

機体の形状データと実際のカメラ画像を用いてカメラの位置姿勢推定を行うために使用する情報を説明するために、例として前方に取り付けられた魚眼カメラの機体に対する位置姿勢推定を行う場合の状況を図 2 に示す。図 2 の左側は、魚眼カメラ映像の模式図である。この図では、画像の下部に機体の像が写っているものとする。また、右側の図は、被写体である機体の形状を表す図である。凸部や凹部などの位置を特定することが容易であるような機体の形状データ上の点  $x_i$  とその点のカメラ画像中での像  $p_i$  の対応関係を用いる。これらの点の対応付けは手動で行う。

このようにして  $N$  対の機体の形状データ上の点  $x_i$  とその点のカメラ画像中での像  $p_i$  の組が得られたときに、このデータから機体に対するカメラの位置姿勢を推定する手法を以下に述べる。

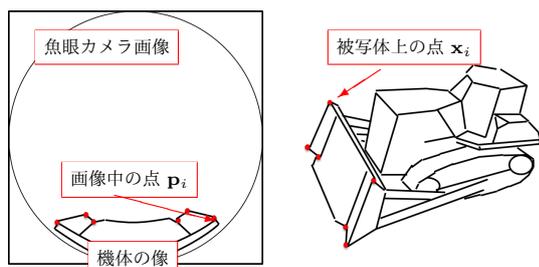


図 2 機体に対するカメラ位置姿勢推定

カメラ座標系における被写体の点の座標  $\mathbf{x}'_i$  とその点のカメラ画像中の像の座標  $\mathbf{p}_i$  がカメラモデル  $\mathbf{p}_i = f(\mathbf{x}'_i)$  で表現できるとする。ここで、カメラモデルとして、魚眼カメラ特有の歪みを考慮するために Scaramuzza らの提案したカメラモデル [5] を用いる。このときあらかじめ定義された 3D モデル上の点  $\mathbf{x}_i$  を回転  $\mathbf{R}$ 、並進  $\mathbf{t}$  によってカメラ座標系に移し、カメラで撮影したと仮定したときの像の座標  $f(\mathbf{R}\mathbf{x}_i + \mathbf{t})$  が実際の像の座標と一致するような  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{t}$  を求めれば良い。そこで、

$$\sum_{k,i} (\mathbf{p}_i - f(\mathbf{R}\mathbf{x}_i + \mathbf{t}))^2 \quad (1)$$

を最小にする  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{t}$  を各カメラについて求める。

### 2.3 キャリブレーション用オブジェクトの機体に対する位置姿勢推定

次に、レーザーレーダの機体に対する位置姿勢を求める。ここでは、レーザーレーダは機体自身を撮影することができない配置に取り付けられているため、カメラの位置姿勢を求めたときのように機体形状を直接用いて位置姿勢推定を行うことができない。そこで、カメラとレーザーレーダの共通視野にキャリブレーション用オブジェクトを配置し、その計測データを用いることで、レーザーレーダの機体に対する位置姿勢を求める。

この段階ではキャリブレーションオブジェクトの機体に対する位置姿勢が不明なので、まずキャリブレーションオブジェクトの機体に対する位置姿勢を求める。ここで、キャリブレーションオブジェクト自体は、カメラとレーザーレーダの共通視野に含まれ互いに平行でないような任意の位置姿勢で配置する。

キャリブレーションオブジェクトの配置を図 3 に示す。この図の右側は機体前方にキャリブレーションオブジェクトとして 2 枚の平板を地面に立てて設置した状態を表している。また図の左側は、このときの魚眼

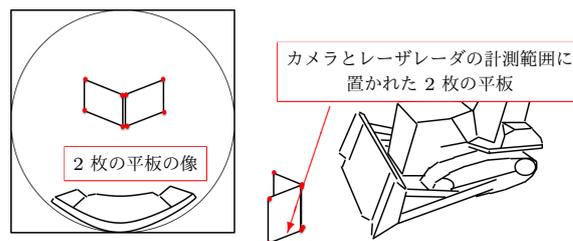


図 3 キャリブレーション用オブジェクトの機体に対する位置姿勢推定

カメラの映像の模式図である。提案手法では、用意に入手可能なキャリブレーション用オブジェクトとして、無地の平板を 2 枚用いる。それぞれの平板は正方形をしており、1 辺の長さは既知である。機体に対する板の位置姿勢を推定するために、図 3 中で赤色で示されているような、板の 4 つの頂点を用いる。板の像の 4 つの頂点の位置をもちいて、機体に対するカメラ外部パラメータの推定と同様にカメラに対する板の位置姿勢を推定し、機体に対するカメラ外部パラメータの逆変換を適用することで、機体に対するキャリブレーションオブジェクトの位置姿勢を推定する。

### 2.4 レーザレーダの位置姿勢推定

最後にレーザーレーダの機体に対する位置姿勢推定を行う。すでにキャリブレーション用オブジェクトは機体に対する位置姿勢が推定されているので、レーザーレーダの機体に対する位置姿勢を推定するためには、レーザーレーダのキャリブレーションオブジェクトに対する位置姿勢を求めればよい。図 4 にキャリブレーションオブジェクトを機体に搭載したレーザーレーダで計測する状況の模式図を示す。図の右側は、レーザーレーダ計測点群が、地面と 2 枚のキャリブレーションオブジェクト平板という 3 枚の互いに平行でない平面を測定している状況を表している。左側は、そのときに得られるレーザーレーダ計測点群である。図中の赤い点、緑色の点、青い点はそれぞれ 2 枚のキャリブレーションオブジェクトのうち 1 枚、残りの 1 枚、そして地面という 3 枚の平面のレーザーレーダ計測点である。このとき得られたレーザーレーダ計測点群の各点の座標はレーザーレーダ固有のセンサ座標系で与えられる。レーザーレーダの機体に対する位置姿勢を求めることは、レーザーレーダ座標系から機体座標系への変換を求めることと等価である。この変換を求めるためには、レーザーレーダか

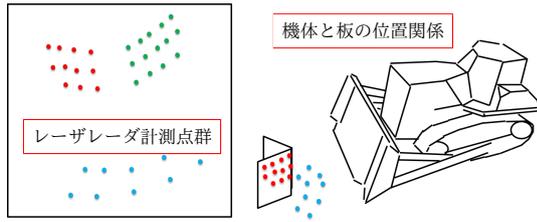


図 4 レーザレーダ位置姿勢の推定

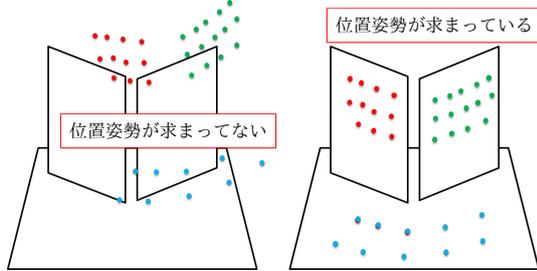


図 5 レーザレーダの機体に対する位置姿勢

ら観測したキャリブレーションオブジェクトの点群が、実際のキャリブレーションオブジェクトの形状と一致するような回転と並進を求める必要がある。具体的に図5を用いて説明すると、この図で左はレーザレーダの機体に対する位置姿勢が求まっておらずレーザレーダ計測点群を移動させても点群が地面とキャリブレーションオブジェクトからなる3平面に乗っていない状況である。また右側はレーザレーダの機体に対する位置姿勢が求まっており、レーザレーダ計測点群が3平面上に存在している状態である。

キャリブレーション用オブジェクトである2枚の板のうち左側の板のなす平面を点  $\mathbf{p}_l$  を通り法線ベクトル  $\mathbf{n}_l$  を持つ平面とし、右側の板のなす平面を点  $\mathbf{p}_r$  を通り法線ベクトル  $\mathbf{n}_r$  を持つ平面とする。また、地面を点  $\mathbf{p}_g = (0, 0, 0)^T$  を通り、法線  $\mathbf{n}_g = (0, 0, 1)^T$  を通る平面とする。

レーザレーダ点群のうち、左の板の点群を  $\mathbf{p}_{li}$ 、右の板の点群を  $\mathbf{p}_{ri}$ 、地面の平面の点群を  $\mathbf{p}_{gi}$  とする。各々の点群がそれぞれの平面上に乗るようにレーザレーダの位置姿勢を定めれば良いので、

$$\sum_i (\mathbf{n}_k \cdot ((\mathbf{R}\mathbf{p}_{ki} + \mathbf{t}) - \mathbf{p}_{gi}))^2, (k = l, r, g) \quad (2)$$

を最小にする  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{t}$  を求める。



図 6 実機実験に用いた機体

### 3 実機を用いたキャリブレーション実験

実際に提案手法を実機を用いた映像提示システムのキャリブレーションに適用した。

#### 3.1 実験装置

図6は、実験に用いた機体の写真である。機体の前方と操縦席の天板部分に魚眼カメラやレーザレーダを搭載するための支柱を取付け、それらの先端に機体の周囲と機体そのものを撮影する魚眼カメラを搭載した。また、前方の支柱の中程には、レーザレーダを搭載した。

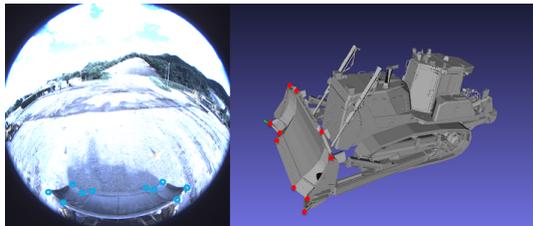
#### 3.2 キャリブレーション実施

実験現場にてキャリブレーションを実施した。はじめに、魚眼カメラの映像を取得し、映像内の機体の像と、機体の3次元形状モデル上の点の組を取得した。今回キャリブレーションを実施する際に用いた点を図7に示す。今回魚眼カメラは前後左右全部で4台使用しているので、図7(a), (b), (c), (d)がそれぞれ前後左右の魚眼カメラに対応している。図の左側が機体に搭載した魚眼カメラで撮影した映像である。また、図の左側が機体形状モデルである。魚眼カメラの映像中で、水色の円で囲まれた部分が、キャリブレーションで使用した画像中の点である。それらの点に対応する機体形状モデル上の点は右側の図中で赤色で表示されている点である。

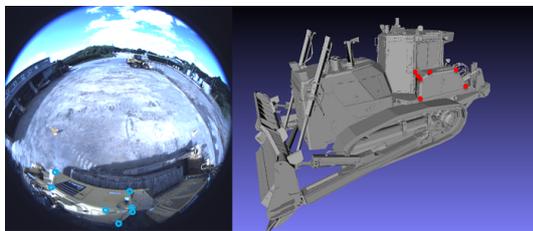
次に、機体の前方にキャリブレーションオブジェクトを配置し、レーザレーダのキャリブレーションを実施した。今回は1辺の長さが1mの正方形の板2枚をキャリブレーションオブジェクトとして使用した。キャリブレーションオブジェクトは、前方魚眼カメラとレーザレーダどちらからも計測可能な位置に設置した。図8にキャリブレーションオブジェクトを設置した状況を



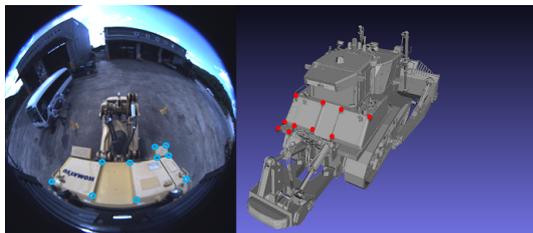
図 8 魚眼カメラ中のキャリブレーション板



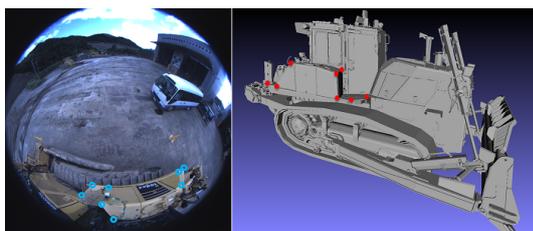
(a) 前方魚眼カメラ



(b) 左方魚眼カメラ



(c) 後方魚眼カメラ



(d) 右方魚眼カメラ

図 7 キャリブレーションに用いた画像中の点

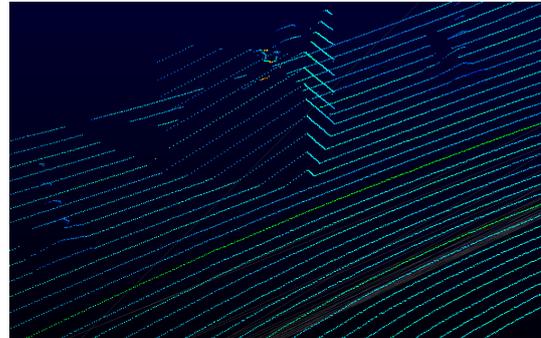


図 9 キャリブレーション板の点群

示す。図の左側は魚眼カメラで撮影したキャリブレーションオブジェクトの像である。キャリブレーションオブジェクトはカメラ映像中心付近に写っている。また図の右側はキャリブレーションオブジェクトを設置した様子を外部から撮影した様子である。またこのとき同時にレーザレーダを用いてキャリブレーションオブジェクトの点群も取得している。このとき得られた点群を図9に示す。魚眼映像中での板の位置は、映像から手動で選択することによって得た。キャリブレーションには、それぞれの板の中心付近の部分の点群と、キャリブレーションオブジェクトの近くの地表面の点群を手動で選択して得られた点群を用いた。

### 3.3 映像生成結果

キャリブレーションを実施した後、テストフィールドにおいて映像生成実験を行った。映像生成実験では、機体に搭載したデスクトップ PC を用いてオンラインで映像を生成し、生成した映像を記録した。また同時に、比較のために環境中に定点カメラを設置し、機体の状況を外部から撮影した。

キャリブレーションによって推定したセンサの位置姿勢を用いて生成した映像を図10に示す。またこのときに外部のカメラで撮影した映像を図12に示す。図10では、機体の表面の細かなテクスチャが鮮明に視認でき、また画面右側にいる人物も鮮明に提示できている。

図 11 は図 10 の機体部分の拡大図である。機体の表面の細かなテクスチャが鮮明であるので、カメラの機体に対する位置姿勢は妥当な値が求まっている。また、画面右側の人物はレーザーレーダによって計測された点群から生成された 3 次元メッシュに魚眼カメラの映像を投影することで提示しているのだが、この部分の映像が鮮明に提示できているので、レーザーレーダの位置姿勢推定の精度も妥当な値であるといえる。

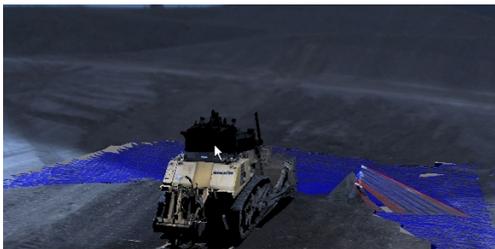


図 10 提示映像

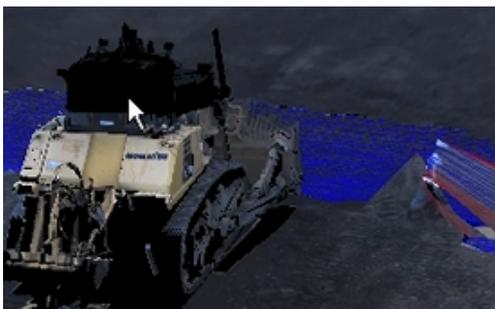


図 11 図 10 の機体拡大図

#### 4 結論と今後の展望

本研究では、レーザーレーダと複数の魚眼カメラからなる俯瞰映像提示システムのための簡便なセンサキャリブレーションを提案した。提案手法では現場で用意



図 12 環境中に設置したカメラで撮影した映像

に入手可能なキャリブレーションオブジェクトを利用する事によって、提示映像中の 3D メッシュデータと映像のテクスチャのズレが少ない映像を生成することができた。

今後の展望としては、今回各カメラ間の位置姿勢の整合性は直接考慮していないが、これを考慮することによるさらなるキャリブレーション精度の向上や、既存手法に比べ提案手法は簡便であるがキャリブレーション精度の面において、従来手法との比較が必要である。

#### 参考文献

- [1] 岩滝宗一郎, 孫蔚, 藤井浩光, 淵田正隆, アレッサンドロモロ, 野田隆司, 久禮一樹, 中沢浩一, 吉灘裕, 山下淳, 浅間一. ブルドーザの位置姿勢変化および周囲危険領域を提示可能な任意視点映像提示. 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 866, 2018.
- [2] Q. Zhang and R. Pless. Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder (improves camera calibration). In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vol. 3, pp. 2301–2306, Sep 2004.
- [3] L. Zhou. A New Minimal Solution for the Extrinsic Calibration of 2D LIDAR and a Camera Using Three Plane-Line Correspondences. *IEEE Sensors journal*, Vol. 14, No. 2, pp. 442–454, 2014.
- [4] G. Li, Y. Liu, L. Dong, X. Cai., and D. Zhou. An Algorithm for Extrinsic Parameters Calibration of a Camera and a Laser Range Finder Using Line Features. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 3854–3859, Oct 2007.
- [5] D. Scaramuzza, A. Martinelli, and R. Siegwart. A Flexible Technique for Accurate Omnidirectional Camera Calibration and Structure from Motion. In *Proceedings of the IEEE International Conference of Vision Systems (ICVS)*, Jan 2006.