

測域センサと魚眼カメラの統合による 油圧ショベルの俯瞰映像内における ダンプトラックの3次元モデルの提示

○菅沢 佑太（東京大学）、筑紫 彰太（東京大学）、小松 廉（東京大学）、
ルイ笠原 純ユネス（東京大学）、Sarthak Pathak（東京大学）、谷島 諒丞（東京大学）、
濱崎 峻資（東京大学）、永谷 圭司（東京大学）、千葉 拓史（株式会社フジタ）、
茶山 和博（株式会社フジタ）、山下 淳（東京大学）、浅間 一（東京大学）

1. 序論

自然災害が発生した場合、迅速な災害復旧が必要である。しかし、2次災害の危険から人の立ち入りが困難な災害現場も存在する。そのような災害現場においては、災害現場に建設機械を設置し、遠隔地のオペレータが遠隔操作をして災害復旧を行う無人化施工が有効である [1]。無人化施工において、最もよく行われる作業の1つに、油圧ショベルとダンプトラックによる土砂積載作業がある。土砂積載作業は、遠隔地の油圧ショベルのオペレータが、油圧ショベルに搭載した車載カメラと施工現場に設置された外部カメラの映像を見ながら実施される [2]。このとき、外部カメラの映像は、遠隔操作をする油圧ショベルと土砂を積載するダンプトラックを第3者視点で確認できる。土砂掘削時には、油圧ショベルのバケットと土砂の相対位置、旋回時には、油圧ショベルとダンプトラックの相対位置、土砂積載時には、油圧ショベルのバケットとダンプトラックのベッセルの相対位置を把握することが可能である。そのため、第3者視点の映像は、遠隔操作の土砂積載作業に欠かすことができない映像である。しかし、外部カメラの設置には、時間を要する問題や、施工現場の環境によっては外部カメラを設置できない問題がある。そこで本研究は、油圧ショベルとダンプトラックの土砂積載作業を対象とし、外部カメラを使用しない第3者視点映像の提示に焦点を当てた。

先行研究として、永谷ら [3] は油圧ショベルに有線給電ドローンを接続し、施工現場の空撮映像を遠隔地のオペレータに提示して無人化施工を行った。しかし、永谷らの研究では風が強い状況下ではドローンの飛行安定性が低下し、ドローンの使用が難しくなり、映像が提示できない。

Sun ら [4] は4台の魚眼カメラをクローラ型移動ロボットに搭載し、各カメラの映像を統合することで、クローラ型移動ロボットを中心とした半球のドーム状の俯瞰映像を生成した。しかし、ドーム状の壁面と底面を仮定して魚眼カメラの映像を投影しているため、クローラ型移動ロボット周辺の高さのある物体の位置・姿勢・形状を正しく提示できない。

Komatsu ら [5] は4台の魚眼カメラを搭載した移動ロボットに測域センサを搭載し、室内環境における壁の位置を検出し、壁が床面に対して垂直であるという仮定の下、俯瞰映像に壁の位置・形状を提示する手法

を提示した。しかし、Komatsu らの研究は壁が床面に対して垂直であるという仮定の下に俯瞰映像内に壁の位置・形状を提示しているため、その仮定に当てはまらない建設機械の位置・姿勢・形状の提示はできない。また、長野ら [6] は油圧ショベルに4台の魚眼カメラを搭載して俯瞰映像を生成し、油圧ショベルのアームに搭載した測域センサを使用して、掘削する土砂の形状を俯瞰映像内に提示した。しかし、長野らの研究では、油圧ショベルのアームに搭載した測域センサではダンプトラックの3次元形状を一部しか計測できないため、ダンプトラックの位置・姿勢・形状を推定することはできない。

以上の背景から、いずれの先行研究も遠隔操作での土砂積載作業には対応できないと考える。そこで本研究では、油圧ショベルとダンプトラックによる土砂積載作業の遠隔操作を対象として、外部カメラを使用せず、油圧ショベルに搭載した車載カメラから第3者視点映像を生成し、その映像内に油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢・形状を提示することを目的とする。

2. 手法

2.1 概要

本研究のオリジナリティは、油圧ショベルに搭載した測域センサを使用してダンプトラックの位置・姿勢を推定し、油圧ショベルに搭載された魚眼カメラから生成した俯瞰映像内に油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢・形状を提示するための手法を新規に提案する点である。

本研究では、俯瞰映像内に油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢・形状を提示する際、油圧ショベルとダンプトラックの3次元モデルを使用する。3次元モデルは、油圧ショベルとダンプトラックの形状を実測し、事前に制作する。これにより、油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢の推定を行い、位置・姿勢の推定を基にそれぞれの3次元モデルを俯瞰映像内に提示する。

本研究の提案手法は2つに分かれる。1つ目は、油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢を推定することである。2つ目は、Komatsu ら [5] の手法に基づいて油圧ショベルに搭載された魚眼カメラから俯瞰映像を生成し、位置・姿勢の推定を基に油圧ショベルとダ

ンプトラックの3次元モデルを俯瞰映像内に提示することである。

2.2 油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢の推定

俯瞰映像内に油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢・形状を提示する場合、油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢を推定する必要がある。Komatsuら [5] の手法に基づいて4台の魚眼カメラから俯瞰映像を生成する場合、AprilTag [7][8] を用いたキャリブレーションで油圧ショベルに搭載された4台の魚眼カメラの位置を求め、魚眼カメラの位置から油圧ショベルの位置を推定する。また、油圧ショベルのアーム・ブーム・バケットの各関節に角度計測センサを搭載することで、各関節の角度情報を取得する。これにより、油圧ショベルの姿勢を推定する。

続いて、ダンプトラックの位置・姿勢は、油圧ショベルに搭載した測域センサを使用して推定する。事前に用意したダンプトラックの3次元モデルの点群が、測域センサで計測したダンプトラックの点群に一致するように、Iterative Closest Point (ICP) [9] を使用して、マッチングを行う。ICPとは、異なる2つの点群が重なり合うように、繰り返し計算を行って点群のマッチングを行うアルゴリズムである。

異なる2つの3次元点群A, Bが, xyz 空間に位置しており, AがBに一致するようにICPを適用する。本研究では、土砂積載作業時には油圧ショベルとダンプトラックは同一平面上に位置している。そのため、点群A, Bの z 座標は一致しているものとする。その場合、点群Aが点群Bに一致する際には、以下の変換 T が適用される。

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & t_x \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 t_x, t_y はそれぞれ x, y 軸方向への並進移動量である。 θ は z 軸に対する回転角である。

本手法では、事前に用意したダンプトラックの3次元モデルの点群が、測域センサで計測したダンプトラックの点群に一致するようにICPを適用し、変換 T を参照することで、ダンプトラックの位置・姿勢を推定する。

2.3 俯瞰映像内における3次元モデルの提示

油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢の推定に基づいて、俯瞰映像内に油圧ショベルとダンプトラックの3次元モデルを提示する。俯瞰映像の生成にはKomatsuら [5] の手法を用いる。油圧ショベルに搭載した4台の魚眼カメラは、図1に示すように、油圧ショベルの周辺360度の視野を確保するように配置する。

俯瞰映像は油圧ショベルの4台の魚眼カメラから生成され、俯瞰映像座標系 Σ_V が図1のように設定される。油圧ショベルは俯瞰映像座標系 Σ_V 内に、第2.2節で求めた位置・姿勢に基づいて3次元モデルを提示す

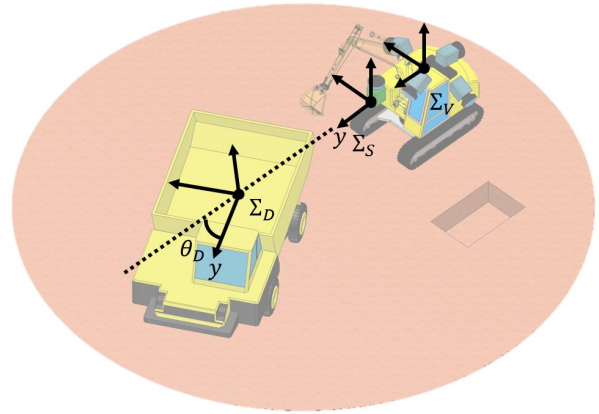


図1 提案手法における座標系

る。

一方、測域センサで推定したダンプトラックの位置・姿勢は、測域センサの位置を原点とする、測域センサ座標系 Σ_S で表現されている。ダンプトラックの位置・姿勢を俯瞰映像座標系 Σ_V で表現し直すことによって、ダンプトラックの3次元モデルを俯瞰映像内で提示することが可能になる。

図1を参考に手順を示す。図1には、俯瞰映像座標系 Σ_V 、測域センサ座標系 Σ_S 、ダンプトラック座標系 Σ_D が示されている。俯瞰映像座標系 Σ_V が測域センサ座標系 Σ_S に一致するための変換を T_{sensor} 、測域センサ座標系 Σ_S がダンプトラック座標系 Σ_D に一致するための変換を T_{dump} で表す。ここで、 T_{sensor} は俯瞰映像座標系 Σ_V と測域センサ座標系 Σ_S の原点同士の相対位置・角度を計測することで、算出する。 T_{dump} は第2.2節で説明したICPにより取得する。このとき、俯瞰映像座標系 Σ_V に対するダンプトラックの位置・姿勢は、変換 $S = T_{\text{sensor}} T_{\text{dump}}$ で表現することができる。 S に基づいて俯瞰映像内にダンプトラックに3次元モデルを提示することで、ダンプトラックの位置・姿勢・形状を提示することができる。

3. 実験

3.1 実験の手順

屋内実験を行った。実験の外観を図2に示す。クローラ型移動ロボットを油圧ショベルの代わりに、車輪型移動ロボットをダンプトラックの代わりに使用した。以降はクローラ型移動ロボットを油圧ショベル、車輪型移動ロボットをダンプトラックと呼ぶ。ダンプトラックは、リバース社のPIONEER-3ATの上部にアルミフレームの骨格を設置した。アルミフレームには黄色の板を設置し、これがダンプトラックのベッセルを表している。ダンプトラックのサイズは縦646 [mm]、横382 [mm]である。なお、油圧ショベルとダンプトラックの3次元モデルは、事前に実測に基づいて用意した。

図2中の青枠で囲まれているものは魚眼カメラであり、魚眼カメラは油圧ショベル上部の各辺の midpoint に1台ずつ搭載されており、油圧ショベルの周辺360度の視野を確保している。各魚眼カメラで静止画を撮影し、4台の魚眼カメラで撮影された4枚の画像を使用して、Komatsuら [5] の手法に基づき俯瞰映像を生成した。各

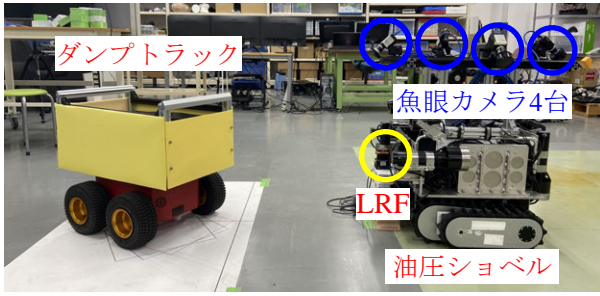


図2 実験の外観

画像の解像度は縦 1600 [pixel], 横 1600 [pixel] である。魚眼カメラの本体には FLIR 社の GS3-U3-41C6C-C, レンズには富士フイルム社の FE185C086HA-1 を使用した。魚眼カメラの本体のセンサーサイズは 1 インチであり, レンズの画角は 185.0 度× 185.0 度である。

油圧ショベルには測域センサとして Laser Range Finder (LRF) を搭載し, ダンプトラックの 2 次元点群を取得した。LRF には HOKUYO 社の UTM-30LX を使用した。LRF のスキャン範囲は前方 270 度であり, 角度解像度は 0.25 度である。今回の実験では, 油圧ショベルは静止している前提とし, 油圧ショベルの姿勢は変化せず, 計測していない。また, 油圧ショベルの位置は第 2.2 節で述べた魚眼カメラのキャリブレーションにより推定した。そのため, ダンプトラックの位置・姿勢の計測のみを行った。

ここで, 図 1 の測域センサ座標系 Σ_S の y 軸と, ダンプトラック座標系 Σ_D の y 軸がなす角を θ_D とおく。実験は θ_D を 30 度, 45 度, 60 度に変更して 3 回行った。実験を 3 回行った理由は, ダンプトラックの姿勢を変化させた場合でも, ダンプトラックの位置・姿勢を推定し, その情報を基に俯瞰映像内にダンプトラックの位置・姿勢・形状を提示できるかを確認する為である。ダンプトラックの下には A0 用紙を設置し, ダンプトラックの位置・姿勢を用紙に印刷された枠に従って手動で変更した。LRF は 2 次元点群を取得するため 2 次元座標で考えてよい。LRF の位置が xy 座標系の原点であるとすると, ダンプトラックの中心座標は 3 回の実験とも全て $(x, y) = (0, 1000)$ [mm] の位置にある。

また, ダンプトラックの位置・姿勢を俯瞰映像座標系 Σ_V に変換する際, 変換 T_{sensor} は油圧ショベルの中心と LRF までの距離・角度を実測し, 算出した。 T_{dump} は ICP により取得した。

3.2 実験結果

3.2.1 ダンプトラックの位置・姿勢の推定

LRF でダンプトラックの 2 次元点群を取得した。事前に用意したダンプトラックの点群が, LRF で取得した点群に一致するように ICP を適用させ, ダンプトラックの位置・姿勢の推定を行った。 $\theta_D = 30$ [deg] のときの点群の比較を図 3 に示す。図 3 は LRF が位置している xy 平面上での各点群を表している。LRF は原点 $(x, y) = (0, 0)$ [mm] に位置している。黒色の点群は $\theta_D = 30$ [deg] の実験条件通りにダンプトラックを設置したときの真値の点群を表している。すなわち, 黒色の点群が表すダンプトラックの中心座標は $(x, y) = (0, 1000)$

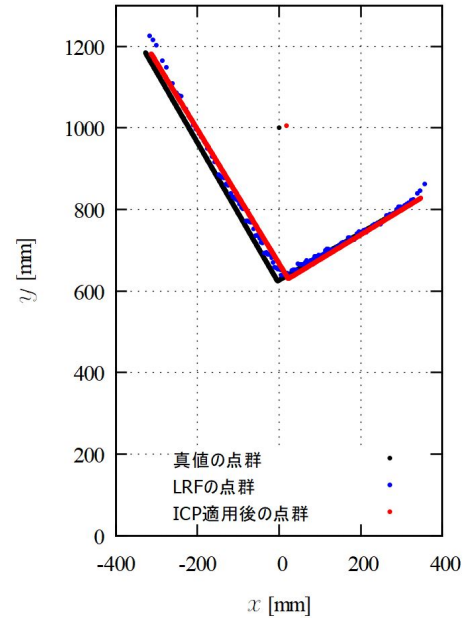


図3 点群の比較 ($\theta_D = 30$ [deg])

[mm], 角度は 30 度である。

青色の点群は LRF で取得した点群である。赤色の点群は, 事前に用意していたダンプトラックの点群に, ICP で得られた変換 T_{dump} を適用した点群である。すなわち, 赤色の点群は ICP のマッチングの結果を表しており, 赤色の点群が LRF で計測した青色の点群に一致していれば一致しているほど, ダンプトラックの中心座標と角度が, 実験条件通りに求まる。 $\theta_D = 30$ [deg] のときの赤色の点群から計算すると, ダンプトラックの中心位置は $(x, y) = (18, 1005)$ [mm], 角度は 31.3 度と推定される。

3 回の実験において, それぞれ ICP を使用して推定したダンプトラックの位置・姿勢と真値との誤差を表 1 に示す。3 回の実験とも, 計測した x, y 座標の真値との誤差は最大で 18 [mm] 程度であり, 計測した角度と真値との誤差は最大で 3 度程度である。この誤差は, 実験条件通りにダンプトラックの位置・姿勢を手動で設置した際の誤差であると考えられる。

3.3 俯瞰映像内におけるダンプトラックの提示

ダンプトラックの位置・姿勢の推定を基に, 俯瞰映像内にダンプトラックの 3 次元モデルを提示した。 $\theta_D = 30$ [deg] のときの結果を図 4 に示す。(a), (d) の半球のドーム状の空間は俯瞰映像を表しており, 中心には油圧ショベルの 3 次元モデルが提示されている。また, 油圧ショベルの前方にはダンプトラックの 3 次元モデルが, 位

表 1 ICP によるダンプトラックの位置・姿勢の推定値と真値との誤差

θ_D [deg]	x 座標 [mm]	y 座標 [mm]	角度 [deg]
30	18	5	1.3
45	13	16	1.4
60	1	14	3.1

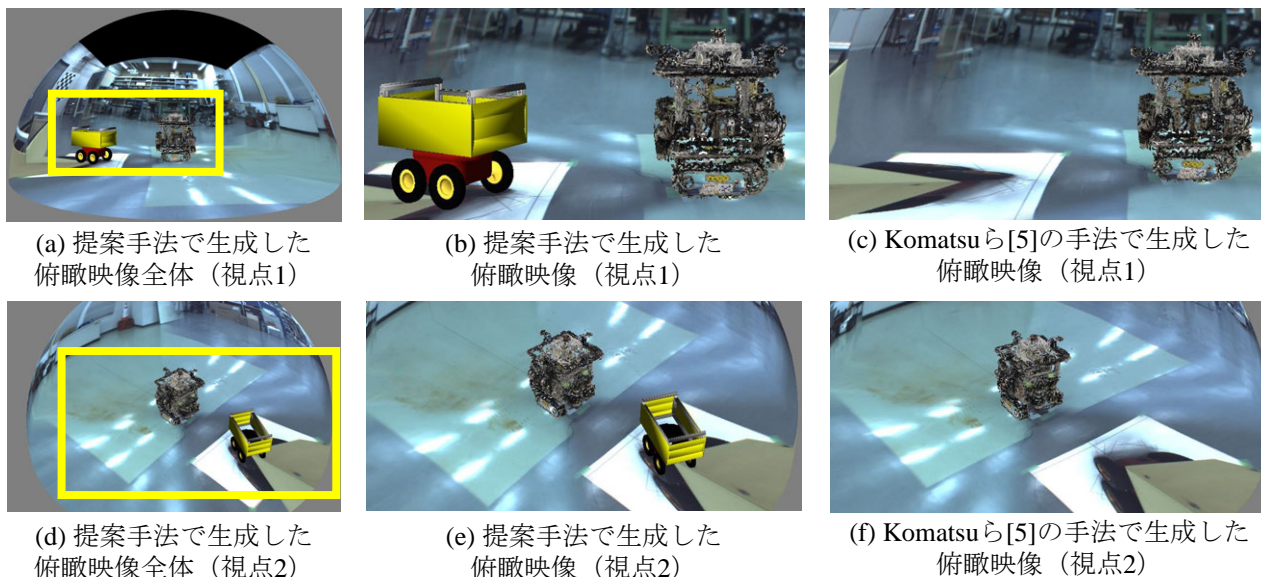


図4 俯瞰映像の比較 ($\theta_D = 30$ [deg])

置・姿勢の推定に基づいて提示されている。

(a), (d)の黄色の枠をそれぞれ拡大したものが, (b), (e)である。また, Komatsuら [5]の手法で生成した同じ画角の俯瞰映像をそれぞれ (c), (f)に示す。(b)と(c), (e)と(f)を比較したとき, Komatsuら [5]の手法で生成した俯瞰映像では, ダンプトラックがドームの底面と壁面に張り付いて表示されており, ダンプトラックの位置・姿勢・形状を正しく提示できていない。対して, 提案手法で生成した俯瞰映像では, 3次元モデルを使用してダンプトラックの位置・姿勢・形状を提示している。

4. 結論

本研究では, 油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢の推定を基に, 俯瞰映像内にそれぞれの3次元モデルを提示する手法を提案した。今回の実験結果では, 油圧ショベルとダンプトラックを俯瞰映像内に3次元モデルで提示できており, 提案手法が有用であることが確認できた。提案手法を使用することにより, 外部カメラが使用できない環境下でも, 油圧ショベルに搭載した魚眼カメラから俯瞰映像を生成し, 俯瞰映像内に油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢・形状を提示することが可能になる。これにより, 油圧ショベルのオペレータは提示された映像を確認することで, 油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢・形状を確認することができ, 土砂積載作業を遠隔操作で実施できるようになると期待される。

今後の課題として, 提案手法はまだリアルタイムで動作することができない。そのため, リアルタイム性を考慮したダンプトラックの位置・姿勢の推定手法を考えていく必要がある。また, 俯瞰映像内に油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢・形状を提示した際に, 実際の油圧ショベルとダンプトラックの位置・姿勢・形状をどれほど忠実に表せているかを定量的に比較する手法を検討する必要がある。上記の問題を克服した後は, リアルタイムで動作するプログラムを実際の油圧ショベルとダンプトラックに適用し, 油圧ショ

ベルのオペレータに提案手法による俯瞰映像を提示して, 土砂積載作業の遠隔操作に対して俯瞰映像が有用であるかどうかを検討する。

参考文献

- [1] 茂木 正晴, 山元 弘: "無人化施工による災害への迅速・安全な復旧活動", 計測と制御, 55 巻, 6 号, pp. 495-500, 2016.
- [2] 吉田 貴: "無人化施工におけるテレロボティクス", 日本ロボット学会誌 2012, 30 巻, 6 号, pp. 585-587, 2012.
- [3] 永谷 圭司, 葉師川 楓, 桐林 星河, 渡辺 敦志: "土砂災害の初動対応を目指した無人建設機械の状態提示技術の研究開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集 2016, 1P1-10a6, pp. 1-3, 2016.
- [4] Wei Sun, Alessandro Moro, Soichiro Iwataki, Ren Komatsu, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: "Simultaneous Tele-visualization of Robot and Surrounding Environment Using Body-mounted Fisheye Cameras", 第 23 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 346-347, 2018.
- [5] Ren Komatsu, Hiromitsu Fujii, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: "Free Viewpoint Image Generation System Using Fisheye Cameras and a Laser Rangefinder for Indoor Robot Teleoperation", ROBOMECH Journal, Vol. 7, 15, pp. 1-10, 2020.
- [6] 長野 樹, 淵田 正隆, 筑紫 彰太, モロ アレッサンドロ, 小松 廉, 藤井 浩光, 山下 淳, 浅間 一: "ロボット遠隔操作のための任意視点映像上での遮蔽物除去", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 2019, 2P1-D10, pp. 1-3, 2019.
- [7] Edwin Olson: "AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system", Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3400-3407, 2011.
- [8] John Wang and Edwin Olson: "AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection", Proceedings of the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4193-4198, 2016.
- [9] Szymon Rusinkiewicz and Marc Levoy: "Efficient Variants of the ICP Algorithm", Proceedings of the Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 145-152, 2001.