

# 建設機械遠隔操作のための周囲カメラ映像および 作業部カメラ映像統合による任意視点映像提示

岩滝宗一郎<sup>\*1</sup> 藤井浩光<sup>\*1</sup> Alessandro Moro<sup>\*1,\*2</sup> 山下淳<sup>\*1</sup> 浅間一<sup>\*1</sup> 吉灘裕<sup>\*3</sup>

## Arbitrary View Presentation by Integration of Surrounding Image and Operation Part Image for Teleoperation of Construction Machines

Soichiro IWATAKI<sup>\*1</sup>, Hiromitsu FUJII<sup>\*1</sup>, Alessandro MORO<sup>\*1,\*2</sup>,  
Atsushi YAMASHITA<sup>\*1</sup>, Hajime ASAMA<sup>\*1</sup>, and Hiroshi YOSHINADA<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup>Department of Precision Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

<sup>\*2</sup>Ritecs, 11-5-3 44 Shibasaki, Tachikawa-shi, Tokyo 190-0023, Japan

<sup>\*3</sup>Komatsu Joint Research Laboratory, School of Engineering, Osaka University  
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565-8651, Japan

During the teleoperation of construction machines and robots, it is essential that the surrounding environment, operation part, and work object are visually presented to the operator. In this paper, we present a novel image representation method that combines these three aspects from an arbitrary point of view using multiple cameras. The image generated by the proposed method is compared to those produced by a conventional method.

### 1. 序 論

近年、建設機械（以降、建機）やロボットの遠隔操作技術が注目を集めている。たとえば、2011年に発生した東日本大震災に付随する原子力発電所の事故への対応や、土石流の危険がある現場における砂防工事などでは、遠隔操作によって建機やロボットを操作することで、危険な場所に作業員が極力接近せず工事を行っている<sup>(1,2)</sup>。特に砂防工事の例では、油圧ショベルやブルドーザといった建機を遠隔操作することで作業が行われている。

しかしながら、遠隔操作を行う際の作業能率はオペレータへの情報提示手法によって大きく影響されることが知られている<sup>(3,4)</sup>。人間が遠隔操作を行う場合、実際に操作を行うオペレータが、建機の周囲の状況や、作業対象物の状況を把握することは極めて重要である。遠隔操作のための映像提示手法はこれまでも数多く提案されている<sup>(5-13)</sup>。

ここで、遠隔操作の対象として、前方に作業機を備えた建機を想定する。たとえば、ブルドーザ（図1）の

ような、機体前方に作業部を持つ建機の操作においては、操縦席から作業部（Operation part）であるブレードや、ブレード内部の土砂の状態を目視することはできない。図1は、操縦席からはブレード内部の状況、例えばブレード内の土砂の量などが操縦席からは目視できない状況を表している。図中で青い吹き出しによって示されている部分が、土砂を押し下り、地表を掘削したりするブレードである。また、ブレード前方の赤い領域は、操縦席から死角になる部分を表している。このような場合作業部が操縦席から目視不可能であるため、Jamesらによる操縦席視点の映像提示<sup>(5)</sup>のような、操縦席にオペレータが乗り込んでいるような映像を提示する手法によってブルドーザを遠隔操作することは困難である。

Hashimotoら<sup>(8)</sup>やOkuraら<sup>(9)</sup>、Kellyら<sup>(13)</sup>の提案している映像提示手法では、環境中に設置したカメラ

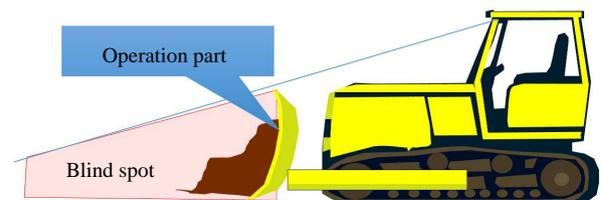


Fig. 1 Blind spot from cockpit

<sup>\*1</sup> 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) { iwataki, fujii, yamashita, asama }@robot.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>\*2</sup> 有限会社ライテックス (〒 190-0023 東京都立川市柴崎町 3-5-11) alessandromoro.italy@ritecs.co.jp

<sup>\*3</sup> 大阪大学大学院工学研究科大阪大学・コマツ共同研究講座 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1) yoshinada@jrl.eng.osaka-u.ac.jp

映像や、機体に搭載した3次元センサ情報から生成された周囲環境の3次元地図の提示などを用いて、機体をあたかも外から眺めているかのような映像を提示している。また、Sanguinoら<sup>(6)</sup>や、Neilsenら<sup>(7)</sup>は、機体に搭載された2次元距離センサやステレオカメラからの情報を元に3次元CG上に、2次元地図と、カメラ映像を同時に提示する手法を提案している。

しかしながら、Hashimotoらの方法では環境中にあらかじめカメラを設置する必要があるため、即応性が求められなおかつ建機の移動する範囲が広範囲となる災害対応への適用は困難となる。また、作業機を備えた建機の遠隔操作によって行う作業の内容は、探査とは異なり、整地やがれき除去といったような、地形を改変する作業が主となる。そのため、一度地図を作成し、その地図をもとに映像を提示する手法やSLAMに基づき映像を提示する手法では、作業の進行に伴い、地図情報と実際の環境の形状に不一致が生じうるため適用は困難である。したがって、作業機を備えた建機の遠隔操作においては、地図情報に依存しないアプローチが望ましい。

地図を作成することなく機体を外から眺めている映像を提示する手法として、カメラ映像を統合する手法が提案されている<sup>(10,11)</sup>。これらの手法は機体に搭載された複数のカメラ映像を幾何学的に変形し、統合することで、オペレータに機体をあたかも上方から眺めているかのような映像すなわち上方からの俯瞰映像を提示する。Satoら<sup>(11)</sup>は上方からの俯瞰映像を用いることで、オペレータは障害物が存在する状況下でも機体周囲の状況を容易に把握することができ、操縦席視点の映像を提示した場合に比べて、走行がより容易になることを明らかにした。しかし、これらの映像提示手法では、カメラは主に機体周囲外側を向いており、作業部と作業対象の様子を提示できないので、機体前方に作業部をもった建機の遠隔操作が困難になることが予測される。

したがって、ブルドーザのような、ブレードを備え、なおかつブレードと作業対象の状況が、操縦席から一切目視できないような建機を遠隔操作するためには、従来の俯瞰映像提示による周囲の状況の提示に加え、作業対象物の状況を同時にオペレータへ提示することが望ましい。また、Liuらの手法やSatoらの手法では、オペレータへ提示される映像は、機体を鉛直上方から見下ろしている視点からのもののみであった。建機の移動という点では、そのような視点は有効であるが、作業を行うためには、鉛直上方からの視点だけでは不十分であり、作業部をより詳細に表示できるよう

に、視点を任意に変更できることが望ましい。

筆者らはこれまで、機体各所に取り付けたカメラから得られる映像を、周囲環境の地表、遠方、機体ならびに作業対象物を表現するように構成された3Dモデルへ統合することによって、建機をあたかも任意の視点から眺めているような映像を提示する手法を提案している<sup>(14)</sup>。しかし、これまでのシステムでは、機体の作業部の形状表現が、2枚の長方形という形状に限定され、十分に実際の状況を反映することができなかった。

そこで、本研究の目的としては、前述の映像提示手法に加え、作業部形状ならびに作業部を実際の状況に近づけることの可能な映像提示手法を構築することとする。本研究において提案する映像提示手法では、機体各所に取り付けたカメラから得られる映像を、周囲環境の地表、遠方、機体ならびに作業対象物を表現するように構成された3Dモデルへ統合することによって提示する。また、提示される映像は、歪みや死角が少ないことが望ましい。そこで、提案手法によって生成された映像と、従来の俯瞰映像提示手法並びに、環境中に設置されたカメラの映像とを比較し、歪みや死角の大きさについて評価を行う。

## 2. 映像提示手法

機体前方に作業部を持つ建機のための映像提示では、画像情報のみを用いて、機体周囲の状況と、作業部の状況、作業対象物の状況を同時にオペレータへ提示する必要がある。提案手法では、前述の要件を満たすために、入力映像を幾何学的に変換し、予め作成しておいた3DCGモデルへ統合することで、映像をオペレータへと提示する。

提案手法の構成を図2に示す。図2に示すように、機体に周囲の状況を撮影する魚眼カメラと、作業部および作業対象物を撮影するカメラ（作業部上方カメラ）を搭載する。魚眼カメラにより撮影された映像は、周囲の環境を表現する3DCGモデルへと統合される。また、作業部を撮影するカメラから得られた映像は、機体の作業部ならびに、作業対象物を表現する3DCGモデルへと統合される。オペレータへ提示される映像は、周囲の環境を表す3DCGモデルの内部に、機体のCGモデル、作業部のCGモデル並びに、作業対象物のCGモデルを配置して表示される。

**2.1 周囲環境の提示** 周囲環境の映像は、機体の前後左右4方向に向けて取り付けられた4台の魚眼カメラを用いて取得し、機体の3DCGモデルを取り囲むように配置された半球面状の三角形メッシュへと投影される。

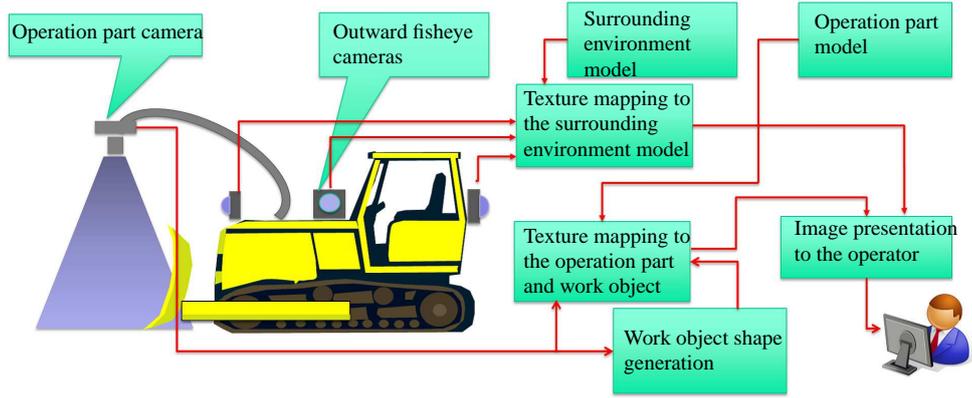


Fig. 2 The system configuration of proposed method

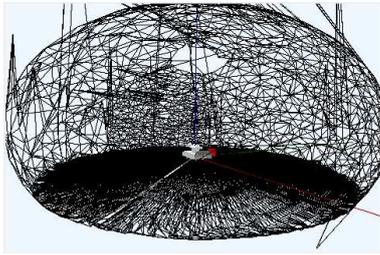


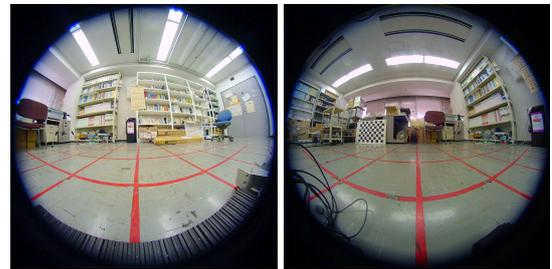
Fig. 3 Sphere mesh for presentation of surrounding environment

テクスチャマッピングに用いる半球形状のメッシュ構造を図3に示す。また、魚眼カメラによって得られた映像の例を図4に示す。このような映像に対しメッシュ構造へのテクスチャマッピングを行うことで、図5に示すような、周囲の環境を球面に貼り付けた3DCGモデルを得る。

**2.2 作業部および作業対象物の提示** 前述の半球面へ投影された魚眼映像のみでは、ブレードの状況をオペレータに提示することができない。例えば図4(d)は前方を向いている魚眼カメラから得られた映像の例であるが、ブレード全体が車体の影になっていて、この映像からは確認することができない。

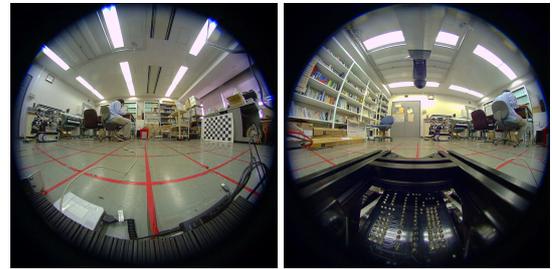
そこで、ブレードの映像は、ブレード上方に設置されたカメラで取得された映像を、3DCGモデルのブレードに相当する部分と、ブレード前方の地表に相当する部分へとテクスチャマッピングすることで提示する。

実環境中のブレードを見るカメラと、3DCG内部の仮想カメラがともに透視投影カメラでモデル化できるとする。つまり、3次元空間中の位置  $\mathbf{x} = (x, y, z)^T$  に存在する点が、カメラで撮影された映像中の座標  $\mathbf{m} = (u, v)^T$  の位置の点に対応するときに、それぞれの点の同次座標  $\tilde{\mathbf{x}} = (x, y, z, 1)^T$ ,  $\tilde{\mathbf{m}} = (u, v, 1)^T$  が3行4列の透視投影行列  $\mathbf{P}$  を用いて次式のように表現できる



(a) Left fisheye camera image

(b) Back fisheye camera image



(c) Right fisheye camera image

(d) Front fisheye camera image

Fig. 4 Input images used to present surrounding environment

ようなカメラであるとする。

$$\tilde{\mathbf{m}} \sim \mathbf{P}\tilde{\mathbf{x}}, \quad (1)$$

ただし、 $\sim$ は式の左辺が右辺の同値関係であることを表す。このように、実カメラに映るブレードの像に含まれる点と、3DCGモデルでのブレード上に含まれる点は、射影変換で関連付けることができる。

また、このような射影変換行列  $\mathbf{P}$  は、空間中の点と画像中の点の対応関係が6対あれば求めることができ



Fig. 5 Presented image of surrounding environment



Fig. 6 Input image of the operation part and work object

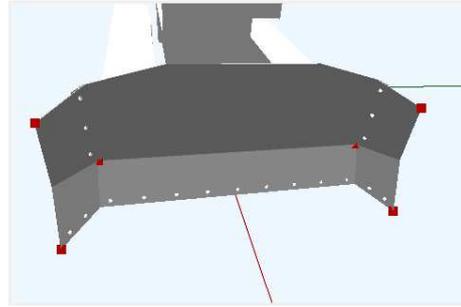


Fig. 7 Pre-defined calibration point of the operation part

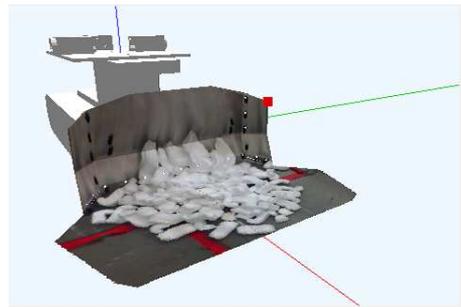


Fig. 8 The example of texture mapping to the operation part and work object

る。提案手法では、 $P$  は作業部 3DCG モデル上の、あらかじめ定義しておいた点と、入力映像に映った作業部上の点を初期化時に与えることで計算している。

図 7 中の赤い点が  $P$  を求める際に用いられる点である。本提案手法において、作業部の提示には、作業部 CG モデルの曲がり角をキャリブレーションに用いるので、6 個以上の曲がり角をもつ作業部であれば、ほかの形状にも容易に適用できる。一旦初期化が完了すれば、カメラ映像と 3DCG モデル内部の平面の位置関係は変化しないので、システム動作中は  $P$  を再計算することなく射影変換が行われる。

例えば図 6 に示すような、ブレードとブレード前方の地表面が写っている実際の作業部上方カメラからの映像に対し射影変換を用いて 3DCG モデル内のブレード平面、地表面へそれぞれテクスチャマッピングを行って、図 8 に示すような、ブレードと地表面の様子を 3DCG モデル内に反映した映像を提示することができる。

**2.3 作業対象物の形状生成** 提示される映像を実際の作業対象物の状況に近づけるために、作業対象物の CG モデルの形状をブレード内部の状況に応じて変化させる。すなわち、ブレード内の土砂の形を反映することができるようにブレード内部の CG モデルの形状を変化させる。実際のブレード内部の土砂の挙動

は極めて複雑であるが、あくまでオペレータが目視で遠隔操作を行うという観点から、ある程度単純化して形状を決定する。

例えば、地盤や土の性質を扱う地盤工学の分野では、土のせん断強さを土の粘着力と、摩擦力によるものと考え、斜面の安定性などを議論している<sup>(15)</sup>。この、せん断強さを粒子の粘着力と摩擦によるものとする考え方は、クーロン則と呼ばれている。粉体を扱う分野でも、粉体の層のせん断を考える際、粉体がクーロン則に従うとする場合があり、粉体の流動性を評価するために、安息角という指標が提案されている<sup>(16,17)</sup>。安息角とは、粉体でできた斜面が崩れず安定して形状を保つことのできる斜面の角度のことをいう。ここでは、建機で土を押していく際、安息角以上の角度になると土が崩れると仮定し、作業部前方の土の形状は大まかには、勾配の角度が安息角で一定になるとする。

また、ブレードによって押される土の形状を、地表面に投影した輪郭は、進行方向に軸対称な、なめらかな形になると仮定する。ここでは、軸対称で微分可能な曲線として、放物線を仮定する。以上の仮定をもとに、土砂の形状を図 9 のように決定する。3DCG モデル中に、進行方向に  $x$  軸、鉛直上方へ  $z$  軸をとり、 $y$  軸を座標系が右手系になるようにとる。土砂の高さを  $z = f(x, y)$  とすると、土砂の前端は地表面で放物

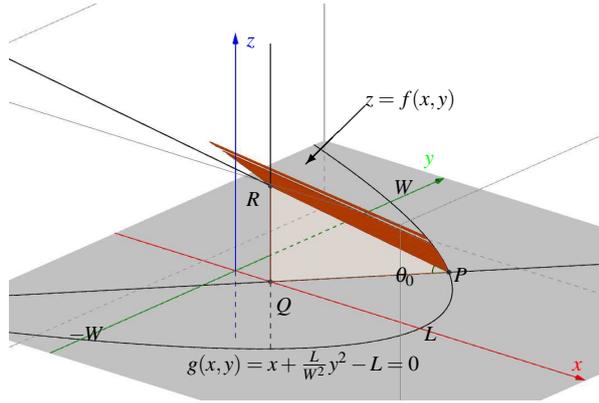


Fig. 9 Earth model

線になると仮定したため、 $W$  は土砂がブレードと接する幅の二分の一、 $L$  はブレードから土砂の前端までの長さとして、境界は  $x = -\frac{L}{W^2}y^2 + L$  となる。また  $z = f(x, y)$  の勾配と地表面の成す角度は安息角に等しいとする。境界を  $g(x, y) = 0$  とすると、これは、土砂の高さ  $z = f(x, y)$  において、 $z = 0$  とした場合の  $f(x, y)$  の定数倍となる。

ここで、境界  $g(x, y)$  の法線方向を求める。  $g(x, y) = x + \frac{L}{W^2}y^2 - L = 0$  に沿って  $g$  上の点を  $(\Delta x, \Delta y)$  動かすとすると、

$$\Delta g = \left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)\Delta x + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)\Delta y = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial g}{\partial x} = 1, \quad (3)$$

$$\frac{\partial g}{\partial y} = \frac{2L}{W^2}y, \quad (4)$$

したがって境界の法線ベクトルは  $(1, \frac{2L}{W^2}y)$  となる。またこのベクトルは、地表面における土砂の勾配の方向も表現している。そこで、境界上に点  $P: (-\frac{L}{W^2}y_0^2 + L, y_0, 0)$  をとる。このとき、点  $P$  を通る  $g(x, y) = 0$  の法線と  $x$  軸の交点  $Q$  は  $Q: (-\frac{W^2}{2L} - \frac{L}{W^2}y_0^2 + L, 0, 0)$  となる。そして、角  $PQR$  は直角、角  $QPR$  が安息角  $\theta_0$  に等しい直角三角形  $PQR$  を定める。 $y_0$  を  $[-W, W]$  の範囲で変化させたとき、辺  $PR$  が掃く曲面を土砂の表面とする。傾斜が一定の角度になるような曲面の形状はこのように定められる。

この土砂形状モデルはパラメータとして安息角  $\theta_0$ 、土砂の幅  $W$ 、土砂の長さ  $L$  をとる。安息角はあらかじめ一般的な土の値を仮定する。土砂の幅と長さをブレード上方カメラ映像から求める。画像中の土砂領域はブレード内の物体のと地表面の明度差などからを求めることができ、土砂の幅と長さを決定できる。

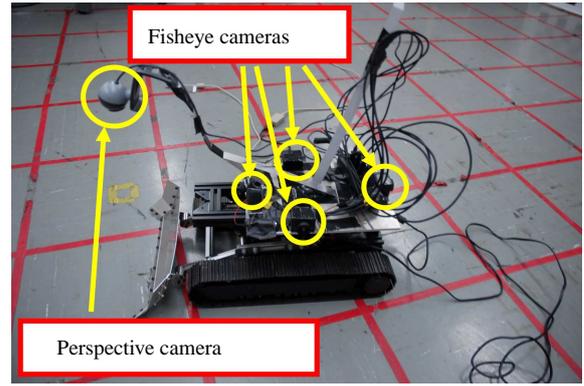


Fig. 10 Model bulldozer used in the experiment

### 3. 提案手法によって提示される映像の評価

提案手法の有効性を確認するため、小型のブルドーザ模型を作成し、模型上にカメラを配置し、操作実験を行った。

**3.1 実験装置** 作成したブルドーザ模型を図 10 に示す。模型上部に設置された金属板の上に取り付けられた、黄丸で示した部分にカメラが搭載されている。

魚眼カメラは全部で 4 台取り付けられており、それぞれの魚眼カメラの視線は前後左右を向いている。これらの魚眼カメラは、周囲の環境を撮影するために取り付けられている。また、ブレード上方に伸びた支柱の先端には小型のカメラが取り付けられており（図 10 中黄丸で示した部分）、そのカメラを用いてブレードの状況とブレード前方の状況を撮影する。

**3.2 実際の画像と提案手法による映像の比較** 提案手法によって、従来手法では提示できなかった作業部前面の状況を提示できることを確認するために、実際に外部から撮影した映像、周囲を向いている魚眼カメラの映像のみを使用した映像、および提案手法によって生成された映像との比較を行った。図 11 は同じ状況下において、模型を上方から撮影した映像と、魚眼カメラ映像のみを用いて生成した俯瞰映像、ならびに魚眼カメラ映像と作業部上方カメラから得られた映像から提案手法によって生成した映像である。図 11(b) においては、機体前方が作業部そのものにより覆い隠され、生成された映像から作業部の状況と機体前方の状況を確認することはできない。一方図 11(c) は提案手法による映像であるが、機体周囲の状況に加え、作業部と機体前方の状況も確認することが可能である。

**3.3 遠隔操作実験** 模型を操作し、土砂に見立てた物体をブレードで押すタスクを試行した。提案手法によって 3DCG モデルへ投影することで得られた任意視点映像と、それぞれの状態に対応する実際の状況を図 12 に示す。

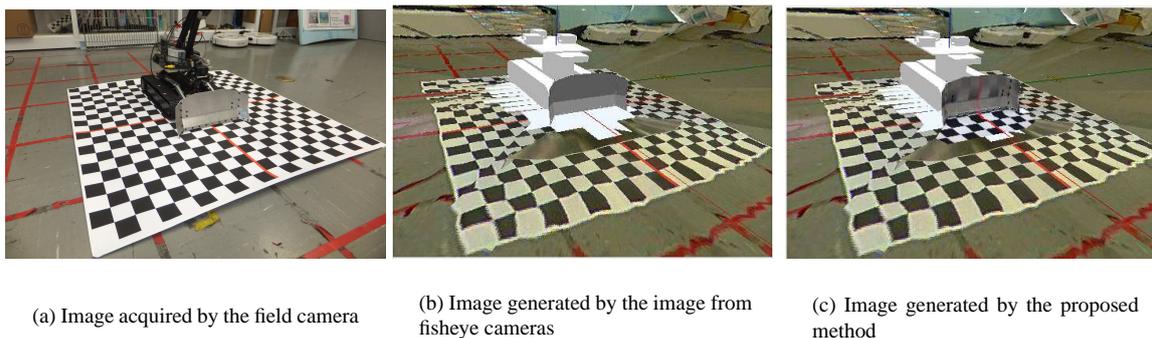


Fig. 11 Images used by the evaluation

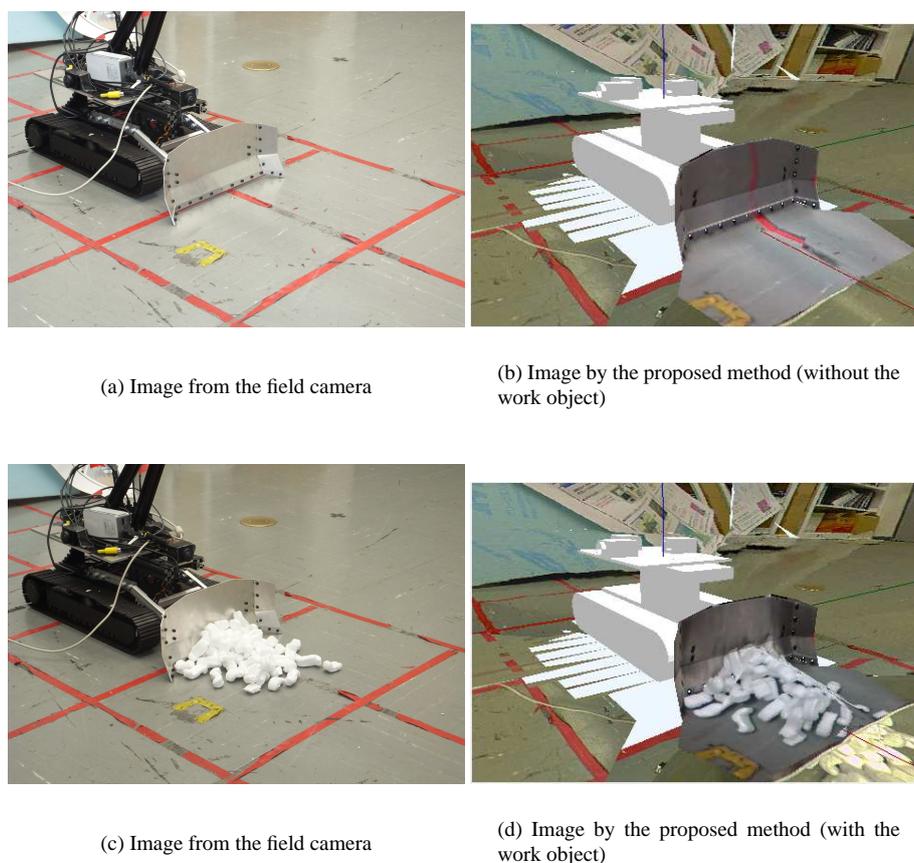


Fig. 12 Images presented by the proposed method

図 12(a), (c) はそれぞれ、ブレード内に模擬土砂が入っている場合と入っていない場合の実際の状態であり、図 12(b), (d) はそれぞれ、ブレード内に模擬土砂が入っていない場合の提示映像と入っている場合の提示映像である。図 12(b), (d) においては、作業部内部の状況と模型周囲の状況が同時に表示されており、作業部内部の状況と周囲の状況を同時に視認することが可能である。また、ブレードに模擬土砂がない場合(図 12(b))と模擬土砂がある場合(図 12(d))では、確かに表示される物体の形状が実際の物体の盛り上がり

が反映された形になっている。これは移動しながら機体前方の作業部で作業を行う、ブルドーザのような建機の遠隔操作にとって重要な特性である。

#### 4. 結 論

本研究では、ブルドーザの周囲の環境とブレード内部の状況を同時に、任意の視点からオペレータに提示する事の可能な映像の提示手法を構築した。その手法は、周囲の状況を撮影する魚眼カメラで得た映像を 3DCG 内の半球上に投射し、ブレード上方のカメラで

得た映像を 3DCG 内のブレード平面と作業対象物に投射するというものである。また、作業対象物の大まかな形状を、実験ではカメラ映像に基づき変化させることが可能である。実験では実際にカメラを取り付けた模型を用いて、周囲の状況とブレード内部の状況が同時に提示できることを確認した。

今後の展望としては、提案手法が実際に操作性の向上につながることを検証するために、複数の被験者を対象に実際の遠隔操作におけるタスクの遂行速度や正確さなどを評価することと、実機への提案手法の適用である。

#### 参 考 文 献

- (1) S. Kawatsuma, M. Fukushima, and T. Okada. Emergency response by robots to fukushima daiichi accident: summary and lessons learned. *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 39, No. 5, pp. 428–435, 2012.
- (2) Y. Segawa, Y. Nanamori, S. Sanji, T. Kitada, and S. Tadokoro. An introduction to japanese r&d activity and political direction on special environment robots. In *Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), 2013 IEEE Region 10*, pp. 29–34, 2013.
- (3) J.Y.C. Chen, E.C. Haas, and M.J. Barnes. Human performance issues and user interface design for teleoperated robots. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, Vol. 37, No. 6, pp. 1231–1245, 2007.
- (4) A. Valtazanos and S. Ramamoorthy. Evaluating the effects of limited perception on interactive decisions in mixed robotic domains. In *Proceedings of the 8th ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction*, pp. 9–16, 2013.
- (5) C.A James, T.P. Bednarz, K. Haustein, L. Alem, C. Caris, and A Castleden. Tele-operation of a mobile mining robot using a panoramic display: an exploration of operators sense of presence. In *Automation Science and Engineering (CASE), 2011 IEEE Conference on*, pp. 279–284, 2011.
- (6) T.J.M. Sanguino, J.M.A Marquez, T. Carlson, and J. Del R Millan. Interaction and evaluation of an augmented virtuality assistance system for teleoperated robots. In *Robotic and Sensors Environments (ROSE), 2012 IEEE International Symposium on*, pp. 19–24, 2012.
- (7) C.W. Nielsen, M.A Goodrich, and R.W. Ricks. Ecological interfaces for improving mobile robot teleoperation. *Robotics, IEEE Transactions on*, Vol. 23, No. 5, pp. 927–941, 2007.
- (8) S. Hashimoto, A. Ishida, M. Inami, and T. Igarashi. Touchme: An augmented reality based remote robot manipulation. In *The 21st International Conference on Artificial Reality and Telexistence, Proceedings of ICAT2011*, 2011.
- (9) F. Okura, Y. Ueda, T. Sato, and N. Yokoya. Teleoperation of mobile robots by generating augmented free-viewpoint images. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 665–671, 2013.
- (10) Y.C. Liu, K.Y. Lin, and Y.S. Chen. Bird’s-eye view vision system for vehicle surrounding monitoring. In *Robot Vision Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 4931, pp. 207–218, 2008.
- (11) T. Sato, A. Moro, A. Sugahara, T. Tasaki, A. Yamashita, and H. Asama. Spatio-temporal bird’s-eye view images using multiple fish-eye cameras. In *System Integration (SII), 2013 IEEE/SICE International Symposium on*, pp. 753–758, 2013.
- (12) J. Tran, A. Ufkes, M. Fiala, and A. Ferworn. Low-cost 3D scene reconstruction for response robots in real-time. In *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 161–166, 2011.
- (13) A. Kelly, N. Chan, H. Herman, D. Huber, R. Meyers, P. Rander, R. Warner, J. Ziglar, and E. Capstick. Real-time photorealistic virtualized reality interface for remote mobile robot control. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 30, No. 3, pp. 384–404, 2011.
- (14) 岩滝宗一郎, 藤井浩光, Alessandro Moro, 山下淳, 浅間一, 吉灘裕.  
建設機械の操作支援のための 3DCG モデルへのテクスチャマッピングを用いた周囲環境と作業部映像の同時提示システム.  
第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集 (SI2014), pp. 2106–2109, 2014.
- (15) 澤孝平編. 地盤工学. 森北出版, 第 2 版, 1999.
- (16) 内藤牧男, 牧野尚夫. 初歩から学ぶ粉体技術. 工業調査会, 2010.
- (17) 粉体工学会編. 粉体工学用語辞典. 日刊工業新聞社, 第 2 版, 2000.