

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

○岩滝宗一郎（東京大学） 藤井浩光（東京大学）

Alessandro Moro（ライテックス，東京大学） 山下淳（東京大学） 浅間一（東京大学）
吉灘裕（大阪大学）

Presentation of Surrounding Environment and Operation Part by Texture Mapping to 3DCG Model for Teleoperation of Construction Machines

○ Soichiro IWATAKI (The University of Tokyo), Hiromitsu FUJII (The University of Tokyo),

Alessandro Moro (Ritecs, The University of Tokyo),

Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo), Hajime ASAMA (The University of Tokyo), and

Hiroshi YOSHINADA (Osaka University)

Abstract:In teleoperation of construction machines and robots, it is essential to present their environment, operation part, and work object to operator. The novel image representation method which can present the image of environment, operation part, and work object together from arbitrary point of view, using multiple cameras. The image generated by the proposed method is compared to the image by conventional method.

1. 序論

近年、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¹⁾や、土石流の危険がある現場における砂防工事²⁾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。

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。オペレータが周囲の状況や作業対象物の状況を把握するためには、建機周辺の映像をオペレータに提示する必要がある。

ここで、ブルドーザ（Fig. 1）のような、機体前方に作業部を持つ機械の操作においては、操縦席から作業部である排土板（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。Fig. 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排土板（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。その

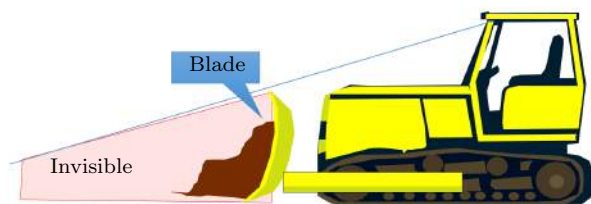


Fig. 1 Invisible area from the cockpit

ため、ブルドーザの操作は、人間が直接操縦席に乗り込んで操作する場合であっても、かなりの熟練を要することが知られている。熟練したオペレータは、ブレード内部の土砂の状況を機体の振動やエンジン音など、感覚に頼って操作を行うが、遠隔操作を行う場合には、オペレータはそのような感覚は一切知覚することはできない。

従来、建機の遠隔操作において、オペレータに建機周囲の映像を提示するためのシステムとして、建機に複数の魚眼カメラを装着し、得られた映像からあたかも建機を上方から眺めているかのような画面を提示する俯瞰映像提示システム³⁻⁵⁾が提案されている。俯瞰映像を提示した場合、オペレータは1つの映像で建機周囲の環境を把握することができ、建機を障害物存在下で移動させる場合では操縦席からの映像のみを提示した場合に比べて作業効率が向上することが佐藤ら⁴⁾によって確認されている。

しかし、機体を上方から見ている俯瞰映像を提示するだけでは、カメラを操縦席の周囲に配置した場合、ブレードと土の様子を提示できないので、作業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機器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できることが望ましい。

そこで、本研究の目的としては、オペレータにとって、容易に周囲の状況と作業対象物の状況とを認識することを可能にするような映像提示手法を構築することを目的とする。

本研究のアプローチを以下に述べる。近距離での遠隔操作においては、直接目視によりオペレータはブルドーザ周囲の状況とブレードの状況のある程度把握できている。そこで、直接ブルドーザを目視できないような、遠距離での遠隔操作においても、あたかもブルドーザを直接目視しているかのような映像を提示することが有効であると想定される。

本研究において提案する映像提示手法（以降、提案手法と呼称）では、あらかじめ周囲の環境やブレードの形状を

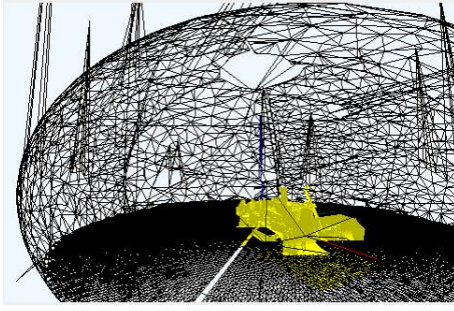


Fig. 2 Mesh model used for presentation surrounding environment

単純な幾何学的形状を仮定する．そして，機体各所に取り付けたカメラから得られる映像をテクスチャマッピングを用いて提示する．

2. 映像提示手法

提案手法では，機体側面に外向きのカメラを設置することで得られる周囲の環境の映像を提示し，側面のカメラでは観測し得ない機体自身は 3DCG モデルで表現する．作業中のブレードの状態は，ブレード上方に設置された別カメラで撮影し，3DCG モデルのブレード上とブレード前方へ投影する．

2.1 外向きのカメラによる周囲環境の提示

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する．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 Fig. 2 に示す．魚眼カメラによって得られた映像の例を Fig. 3 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，Fig. 4 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 作業部上方カメラによるブレードの状況の提示

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 Fig. 3(a) 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，ブレードが平面だと仮定した 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．このカメラのおおよその配置は，別途作成したカメラシミュレータ (Fig. 5) により設計する．テクスチャマッピングの具体的な処理の内容は次の通りである．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．

このとき，3 次元空間中の点 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4$ を頂点に持つような長方形に含まれる点 $\mathbf{p}$ を考えると， $\mathbf{p}$ はパラメー



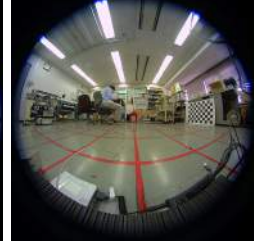
(a) Front fish eye camera image



(b) Back fish eye camera image



(c) Left fish eye camera image



(d) Right fish eye camera image

Fig. 3 Images used for

presentation surrounding environment

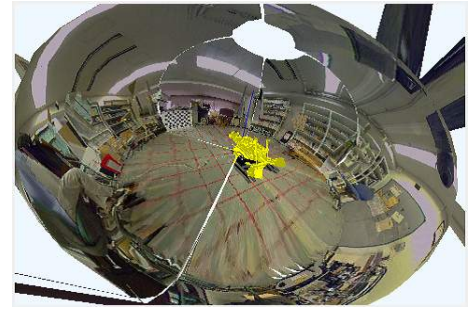


Fig. 4 Presented surrounding environment

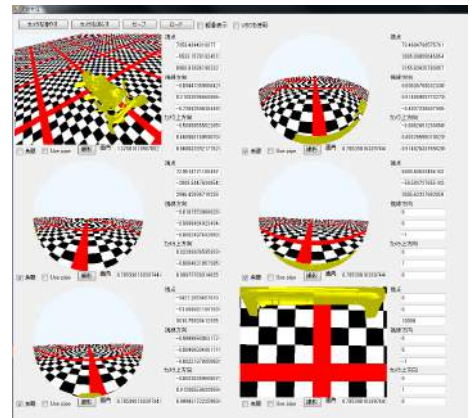


Fig. 5 Simulation software used to determine layout of cameras

タ s, t を用いて次のように表現できる．

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= s(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) + t(\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1) \\ &= \begin{pmatrix} \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1 & \mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

$\mathbf{p}$ とパラメータ s, t の関係は、 $\mathbf{p}$ の同次座標 $\tilde{\mathbf{p}}$ で表現すると次のようになる。

$$\tilde{\mathbf{p}} \sim \begin{pmatrix} \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1 & \mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s \\ t \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

この式を式 (1) へ代入すると平面上の点 $\mathbf{p}$ のパラメータ s, t による表示 $(s, t)^T$ の同次座標表現 $(s, t, 1)^T$ と、映像中での点 $\mathbf{p}$ の像の同次座標表現 $\tilde{\mathbf{m}} = (u, v, 1)^T$ は次のように、3 行 3 列の行列 $\mathbf{H}$ を用いて関連付けることができる。

$$\tilde{\mathbf{m}} \sim \mathbf{H} \begin{pmatrix} s \\ t \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

式 (4) は 2 次元平面から 2 次元平面への射影変換を表している。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 $\mathbf{H}$ は、対応点が 4 対あれば求める事ができる。3 × 3 行列 $\mathbf{H} = \{h_{ij}\}$ について $\mathbf{h}$ を

$$\mathbf{h} = (h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32}, h_{33})^T, \quad (5)$$

とおくと、1 対の対応点 $(s_i, t_i)^T, (u_i, v_i)^T$ からは次の 2 式が得られる。

$$\begin{aligned} s_i h_{11} + t_i h_{12} + h_{13} \\ - s_i u_i h_{31} - t_i u_i h_{32} - u_i h_{33} &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} s_i h_{21} + t_i h_{22} + h_{23} \\ - s_i v_i h_{31} - t_i v_i h_{32} - v_i h_{33} &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、4 対の対応点が与えられているとすると、上記の式と同様の形の式が全部で 8 本定める事ができ、8 行 9 列の行列 $\mathbf{B}$ と 9 次元ベクトル $\mathbf{h}$ を用いて次のように表現できる。

$$\mathbf{B}\mathbf{h} = \mathbf{0}. \quad (8)$$

式 (8) を満たす $\mathbf{h}$ は、 $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ の最小固有値に対応する固有ベクトルとして求めることができる。このようにして $\mathbf{H}$ を求めることが可能である。

提案手法では、ブレード上方カメラ映像から 3DCG モデル内のブレード平面への射影変換 $\mathbf{H}_1$ 、地表面への射影変換 $\mathbf{H}_2$ は、システムの初期化時にブレード上方カメラ映像内の点を手動で与えることで求めている。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 $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$ を再計算することなく射影変換が行われる。

例えば Fig. 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、Fig. 7 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。

3. 提案手法を用いた操作実験

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。



Fig. 6 Input image that reflected the blade forward and blade

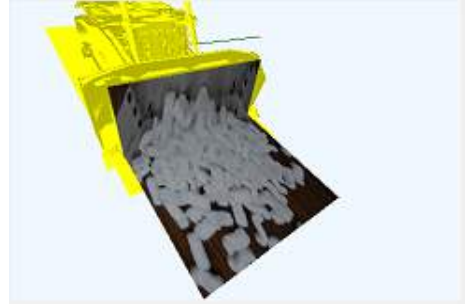


Fig. 7 Presented the blade forward and blade in 3DCG model

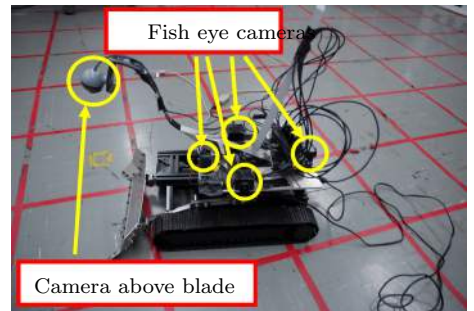


Fig. 8 Miniature bulldozer used in experiment

3.1 実験装置の構成

作成したブルドーザ模型を Fig. 8 に示す。模型上部に設置された金属板の上の黄丸で示した部分が魚眼カメラである。

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 (Fig. 8 中の、支柱先端の黄丸で示した部分)、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。

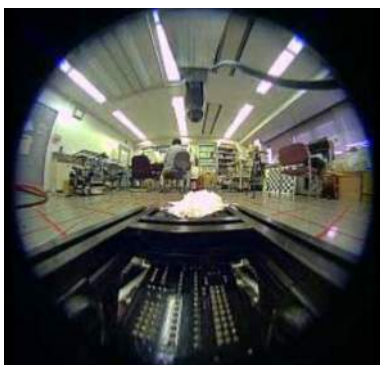
3.2 実験結果

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。実験の様子を Fig. 9(a) に示す。

魚眼カメラやブレード上方のカメラで撮影した実際の映像と、提案手法によって 3DCG モデルへ投影することで得られた映像を比較した。入力映像の一例として、前方魚眼カメラで得られた映像を Fig. 9(b) に示す。このカメラ映像のみでは、ブレードの中の物体の量など、作業進行状況を



(a) Overall view



(b) Front fish eye camera image

Fig. 9 Teleoperation experiment

示すブレード内部の状況を知ることはできない。提案手法により作成した提示映像を Fig. 10 に示す。Fig. 10 においては、ブレード内部の状況と模型周囲の状況が同時に表示されており、確かに周囲の状況とブレード内部の状況を同時に視認することが可能である。例えば、Fig. 10(a) では、ブレード内に物体はなく、Fig. 10(b) では、物体を押している様子が確認できる。

4. 結論

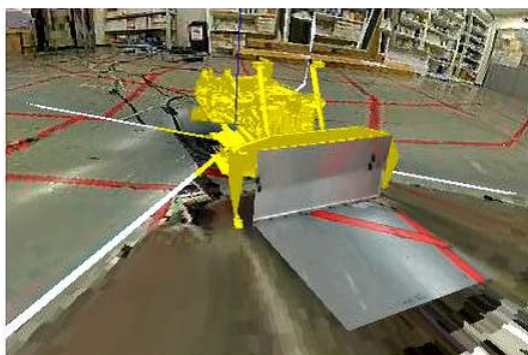
本研究では、ブルドーザの周囲の環境とブレード内部の状況をわかりやすくオペレータに提示する事の可能な映像の提示手法を提案した。周囲の状況を撮影する魚眼カメラ

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ブレード前方の地表面に投射することで、周囲の環境とブレード内部の状況を同時に提示することを実現した。また、CG を用いてカメラの配置を検討し、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。

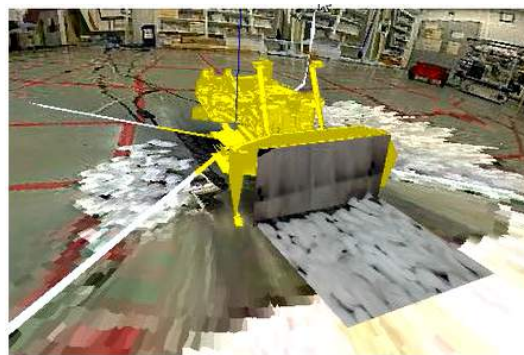
今後の展望としては、提案手法が実際に操作性の向上につながることを検証するために、複数の被験者を対象に実際の遠隔操作における、タスクの遂行速度や、正確さなどを評価する予定である。

参考文献

- 1) 大野和則: レスキューロボットにおけるテレロボティクス, 日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 6, pp. 571-573, 2012.
- 2) 供田英一, 岩崎肇, 岡本仁: 赤松谷川 9 号床固工工事における無人化施工, 建設の施工企画, pp. 14-20, 2010.
- 3) 高橋健一, 藤本健治郎, 阿子島学: 建設機械向けアラウンドビューモニターの現場検証結果, 建設の施工企画, pp. 66-68, 2009.
- 4) 佐藤貴亮, Alessandro Moro, 藤井浩光, 杉本和也, 野末晃, 三村洋一, 小幡克実, 山下淳, 浅間一: 無人化施工における疑似俯瞰映像提示システムの開発, 第 19 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 346-352, 2014.
- 5) 石本英史, 古渡陽一, 稲野辺慶仁, 川股幸博, 太田守飛: 鉾山機械用全周囲安全支援装置 skyangle, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 予稿集, pp. 1P1M04(1)-1P1M04(2), 2014.



(a) Blade empty



(b) Blabe with work object

Fig. 10 Images presented by the proposed method