

バックホウの盛土作業における遠隔操作のための映像評価

○森山 湧志 (東京大学), 藤井 浩光 (東京大学), 田村 雄介 (東京大学),
山川 博司 (東京大学), 三鬼 尚臣 (株式会社フジタ), 千葉 拓史 (株式会社フジタ),
山本 新吾 (株式会社フジタ), 茶山 和博 (株式会社高環境エンジニアリング),
永谷 圭司 (東京大学), 山下 淳 (東京大学), 浅間 一 (東京大学)

Evaluation of Images for Teleoperated Excavator in Banking

○Yushi MORIYAMA (The University of Tokyo), Hiromitsu FUJII (The University of Tokyo),
Yusuke TAMURA (The University of Tokyo), Hiroshi YAMAKAWA (The University of Tokyo),
Hisami MIKI (Fujita Co.,Ltd), Takumi CHIBA (Fujita Co.,Ltd),
Shingo YAMAMOTO (Fujita Co.,Ltd), Kazuhiro CHAYAMA (KOKANKYO Engineering Co.,Ltd),
Keiji NAGATANI (The University of Tokyo), Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo),
and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract : When any disaster occurs, teleoperation of construction machineries enables operators to keep safe. However, work efficiency of teleoperation is less than that of usual operation with operators in machineries. One of the reason is that operators of construction machineries are not able to receive appropriate images what are controlled to provide work report by camera-operators. To automate offering images like the way experienced camera-operators do is effective because they can offer images what operators of construction machinery require. In order to do that, a quantitative evaluation of images is essential. We focused on banking by teleoperated excavator and sorted requirements for images. In addition to this, we proposed an evaluation method of requirements by using images and LiDAR. Based on the experimental results, the proposed method can evaluate and classify images according to requirements.

1. 緒言

地震や噴火, 台風などの自然災害が発生した場合, 被害のさらなる拡大を防ぐために, 復旧作業を速やかに行う必要がある。しかし, 現場は土砂崩れなどの二次災害が発生する可能性があり, 作業員がそれに巻き込まれることは回避する必要がある。そのため, 建設機械を遠隔操作することで作業を行う無人化施工は, 復旧作業において有効な技術である [1][2]。建機を操縦するオペレータ (以下, 建機オペレータ) は, 複数のカメラから提供される映像が表示されたモニタをもとに遠隔操作を行っている。建機オペレータへの映像提示には, 建機のキャビンに搭載され完全に固定された車載カメラと, 作業現場の環境内に固定されたカメラ, そして移動カメラ車に取り付けられたカメラの 3 種類が用いられる。また, 環境固定カメラと移動カメラ車の操作は, 建機オペレータとは別のカメラを操作するオペレータ (以下, カメラオペレータ) が行っており, カメラオペレータは各カメラのパンチルトズームを操作している。この無人化施工システムは, 実際の復旧作業現場にも利用されており, 具体例を挙げると雲仙普賢岳の砂防堰堤建設 [1][3][4] や, 南大隅で発生した土砂災害の砂防工事 [5], 有珠山噴火時の災害復旧工事 [6][7] などにおいて実績がある。一方で, 建機の遠隔操作は, 通常行われる搭乗操作と比

較して作業効率が低く, 土木工事の場合およそ 6 割程度にまで落ち込むと言われている [4]。その作業効率低下の要因の 1 つに, カメラオペレータが建機オペレータが望む映像を適切に提供できていないことが挙げられる [8]。建機オペレータに適切な映像を提示するためには, 同じ現場で長い作業経験が必要となるが, 災害発生時には, そのような人材が常に確保できるとは限らない。したがって, 災害対応のための無人化施工の現場において, 熟練のカメラオペレータが行っている映像提供を自動化することは有効であると考えられる。そのためには, 現在提示されている映像が作業を遂行する上で適切であるか否かを定量的に評価する手法が必要である。また, 建機の遠隔操作において, 同じ作業であってもその出来高や状況によって求められる映像は異なるため, 映像評価を行うには, 作業対象の状態を考慮する必要がある。

建機遠隔操作における映像提供の自動化に取り組んだ研究として, Kamezaki らは多数の環境固定カメラから少数の有用な映像を割り出して提供する手法を構築している [9]。この手法では, 撮影範囲を建機本体, 建機のアーム部分, およびアームの先端の 3 つに予め定義しており, 現在建機が行っている作業に応じてカメラの自律制御を行っている。しかし, この手法は, 撮影対象を建機のみとしてお

り、周辺環境の確認を行うための情報提供は考慮していない。そのため建機の作業状況は把握できるが、作業対象物の形状評価を行うことができない。そこで、本研究では、具体例として図 1 に示すようなバックホウを用いた盛土作業を扱い、現在提示されている映像が建機遠隔操作においてどの程度作業が行いやすいものであるか、周辺環境も含めた評価法を構築する。

2. 問題設定とアプローチ

本章では、無人化施工における作業についての概要を示し、本研究で扱うバックホウの遠隔操作による盛土作業について述べ問題設定を行う。また、第 1 章にて提示した作業対象の状態を考慮した映像提供に関する問題を解決するための要求仕様を明確化する。

2.1 問題設定

盛土は、バックホウを用いて土砂を積み上げて固めることにより、土砂型枠の成型を行う作業である。この作業は砂防ダム建設に必要な不可欠な工程であり、無人化施工において極めて重要な役割を果たす。盛土作業の工程を図 1 に示す。図 1(a) を初期状態とし、図 1(b) のように重ダンプなどによって運ばれてきた土砂を積み上げて、盛土の概形を作成する。次に図 1(c) に示すようにバケットを用いて土砂を固めることで型枠の成型を行う。その際、図 2 に示す型枠の傾斜面である法面 (Face of slope) がねじれていないか、法面上端と下端である法肩 (Top of slope) と法尻 (Foot of slope) が互いに平行を保っているかを確認を行うことが重要となる。型枠の法面が平らになっているか否かの確認は車載カメラでは困難であるため、外部映像を用いた確認が必要となる。本研究では、バックホウの盛土作業における型枠成型を想定し、その作業における映像評価を行う。

2.2 要求仕様

本研究ではバックホウの遠隔操作における盛土作業のための映像に対する要求仕様を設定するために、無人化施工の現場監督に、実際の作業映像と照らし合わせつつヒアリングを行った。それにより得られた知見から、以下の 2 点の要求仕様を設定する。

- (1) 法面が画面に対し縦方向に分布していること
- (2) 画面中央に作業箇所が提示されていること

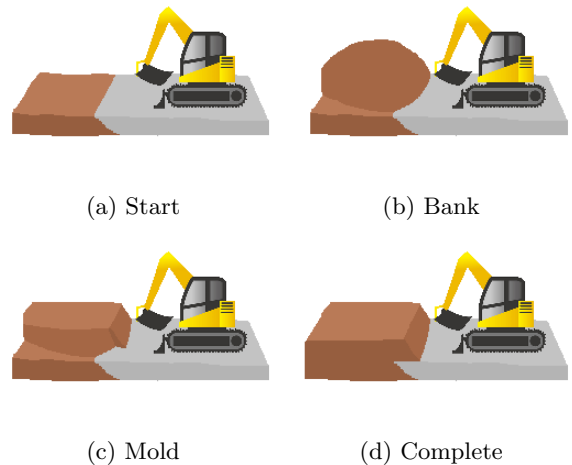


Fig. 1: Process of banking by excavator

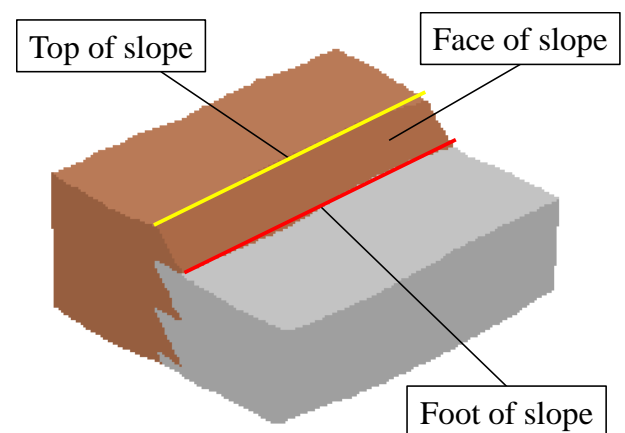


Fig. 2: Shape of embankment and name of parts

盛土作業の型枠成型において最も必要とされているのは、図 2 に示す法面の表面が平らであるかどうか、ならびに法肩と法尻が平行であるかの評価、すなわち法面の形状の評価を行うための映像である。

1 点目について、法面の凹凸を観察するため、法面を画面縦方向に表示させる必要がある。この視点は車載カメラでは得ることができないため、カメラオペレータによる映像提供が必要不可欠となる。

2 点目については、建機オペレータの視認性向上のため、作業箇所を画面中央付近に表示させなければならない。今回の問題設定では作業対象物は法面であり、作業箇所はバケットと法面が接する地点であるため、作業箇所と法面をどちらも画面中央付近に表示させる必要がある。

3. 提案手法

本研究では、2.2 節で示した要求仕様を映像が満たしているか把握し評価を行うため、法面とアームの 3 次元位置

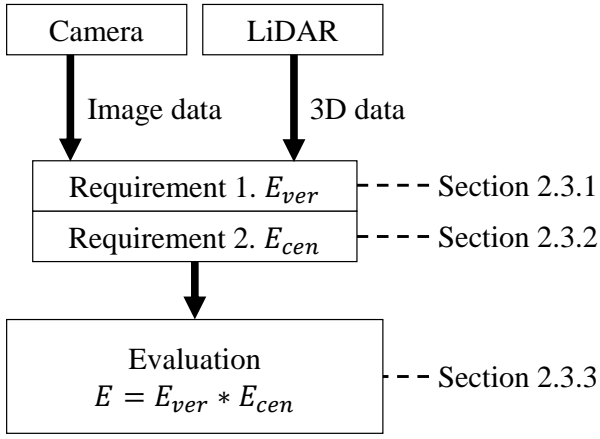


Fig. 3: Schematics of the proposed method algorithm

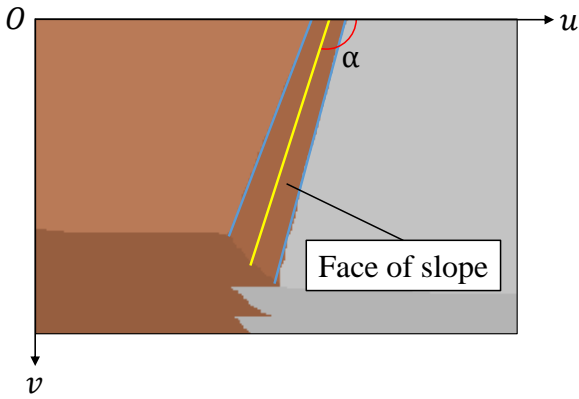


Fig. 4: Angle α used for evaluating requirement 1

情報から映像の評価を行う手法を提案する。本研究におけるアルゴリズムを図3に示す。まず、カメラから画像データを、そしてLight Detection and Ranging (LiDAR) から3次元距離情報を取得する。次に、得られた3次元距離情報から法面と建機アームの位置を特定し、画像データからそれぞれの要求仕様に対する評価値を算出する。最後に、各評価値を積算させ、得られた値を映像の評価値とする。各評価値はいずれも0以上1以下の実数で示され、値が大きければ大きいほど良いものとする。

3.1 法面の画面縦方向への分布

要求仕様1について、法面が画面縦方向に表示されているかは、図4に示す法肩と法尻(青線)からの距離が等しい直線(黄線)を用いて、 u 軸から v 軸へと向かう角度 α から評価を行う。実作業映像では $\alpha = 90^\circ$ 付近で表示された映像は存在せず、ある程度以上の角度になれば作業を行うことが可能となると考えられる。そのため $\alpha = 90^\circ$ 付近では評価の変動を考える必要はない。一方で、 $\alpha = 90^\circ$ から離れれば離れるほど評価の変動を大きくとる必要がある

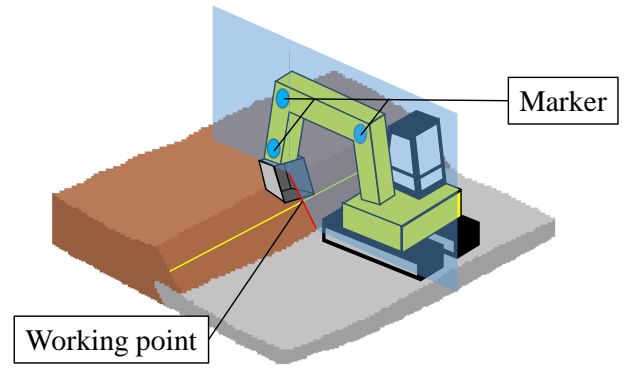


Fig. 5: Specifying the working point used for evaluating requirement 2

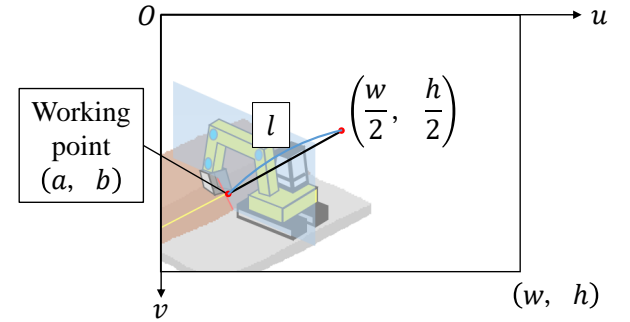


Fig. 6: length l used for evaluating requirement 2

と考えられる。そこで、評価値 E_{ver} を求める計算式を

$$E_{ver} = \sin \alpha \quad (1)$$

と設定することとした。

この角度 α は、3次元距離情報を用いて土砂型枠の上の平面と地面の平面を検出し、その間に法面が存在することから直線を求めることで得ることができる。

3.2 作業箇所と法面の画面中央付近の表示

要求仕様2について、作業箇所と法面の2つの要素をそれぞれ分けて評価を行う。作業箇所についてはマーカを使用して位置を推定する。図5に示すようにバックホウのアームの関節部分に3点のマーカを設置し、その3点を含む平面上にバケットが存在することから、平面と3.1節で求めた法面を示す直線の交点を作業箇所として導き出す。画面中央から作業箇所までの距離は、作業箇所の座標を (a, b) 、画像の解像度を (w, h) とすると、図6より

$$l = \sqrt{\left(a - \frac{w}{2}\right)^2 + \left(b - \frac{h}{2}\right)^2} \quad (2)$$

と表すことが可能である。評価値 e_p は l を変数とした1次関数とし、作業箇所が画面中央にある時は1、画面の最

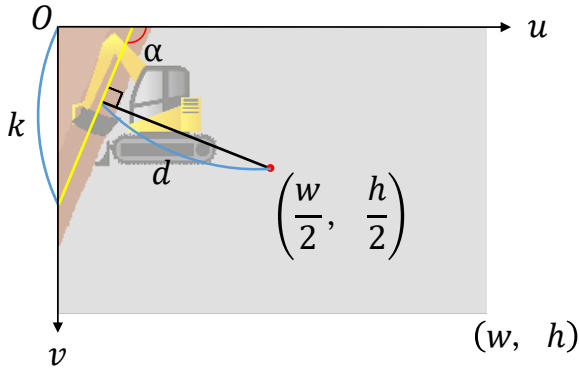


Fig. 7: length d used for evaluating requirement 2

も遠い点（映像の4隅）にある時は0となるように、計算式を

$$e_p = 1 - \frac{2l}{\sqrt{w^2 + h^2}} \quad (3)$$

と設定する。

法面と画面中央の距離については、3.1節で求めた黄線を法面とみなし、その直線と画面中央までの距離を用いて計算する。この距離 d は角度 α と画面縦方向の切片 k を用いて図7より

$$d = \left| \frac{w}{2} \sin \alpha + \left(\frac{h}{2} + k \right) \cos \alpha \right| \quad (4)$$

と表すことが出来る。

この評価値 e_l も e_p と同様に d を変数とした1次関数とし、法面が画面中央に表示されているときは1、画面の最も遠い点（映像の4隅）にある時は0となるように、計算式を

$$e_l = 1 - \frac{2d}{\sqrt{w^2 + h^2}} \quad (5)$$

と設定する。

e_p と e_l どちらも作業対象物の画面中央からの距離を変数とした一次関数であり、必要不可欠な要素である。こちらを総合させた評価値 E_{cen} は E_{ver} と異なり画面のどこにおいても評価値の変動の大きさは変わらないと考えられるため、 e_p と e_l の和から評価値 E_{cen} を

$$E_{cen} = \begin{cases} \frac{e_p + e_l}{2} & (e_p e_l \neq 0) \\ 0 & (e_p e_l = 0) \end{cases}$$

と設定する。

3.3 映像の評価

2.2節で示した要求仕様は、どちらかが欠けてしまうとバックホウの盛土作業において必要とされている法面の形状評価が行えなくなる。そこで、2点の要求仕様に対する



Fig. 8: Experimental system

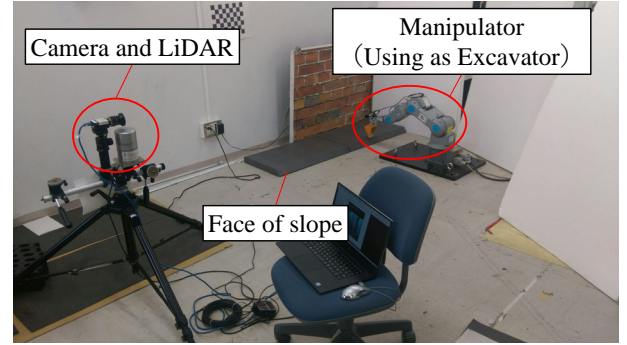


Fig. 9: Experimental image

評価値は、それぞれ加算ではなく積算し、映像全体の評価値を

$$E = E_{ver} * E_{cen} \quad (6)$$

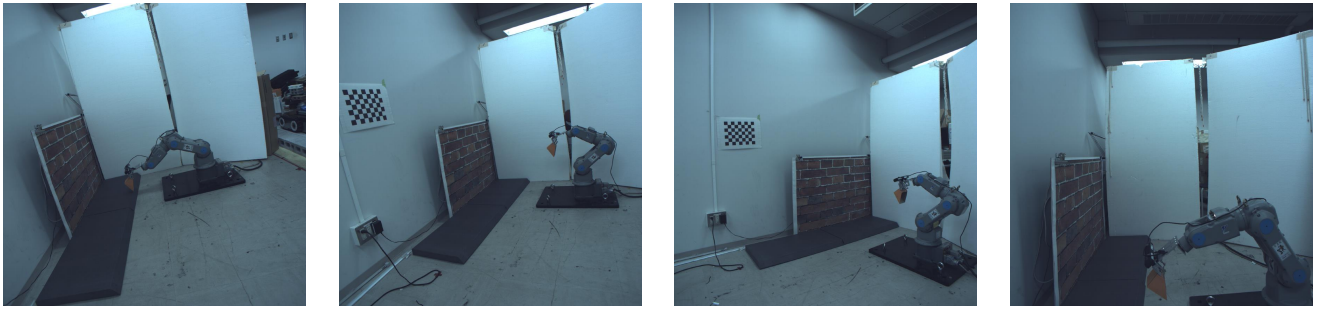
と設定することとした。

4. 実験

4.1 実験環境

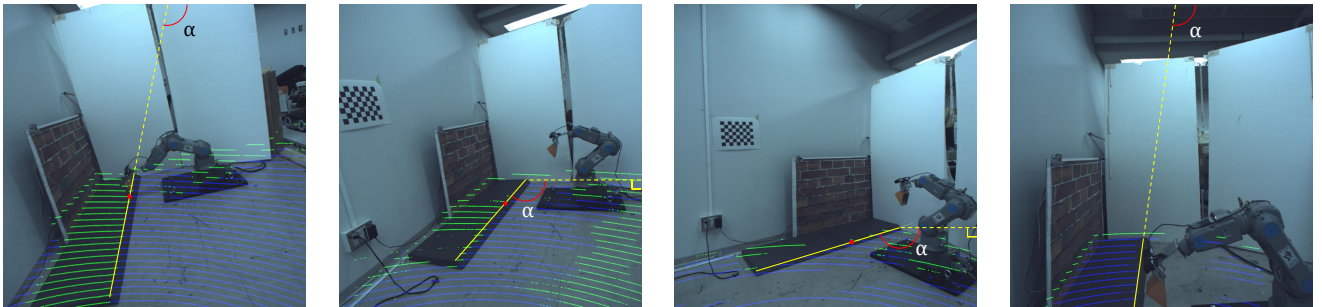
本実験で使用したカメラとLiDARの配置を図8に示す。カメラについてはPoint Grey Research社のGrasshopper3 GS3-U3-41C6C-C、LiDARについてはVelodyne社のHDL-32eを使用した。LiDARは水平全方位360°と垂直視野41.3°(+10.67°~-30.67°)の測定が可能である。また、本実験では、バックホウの代わりにマニピュレータを用いる。マニピュレータについては安川電機社のMOTOMAN-HP3Jを使用した。

本実験は図9に示すような環境で行った。屋内でマニピュレータの前方に土砂型枠を模擬した法面を設置し、カメラの位置を変え複数の画像を撮影した。法面は、実際の現場の1/12のスケールで作成した。この環境において得られたデータから2.3節で設定した評価値を計算し、得られた値が映像の各要求仕様を満たしているかの評価を行った。



(a) Face of slope is displayed in a vertical direction and working point is displayed nearby the center. (b) Face of slope is displayed in a slanting direction and working point is displayed nearby the center. (c) Face of slope is displayed in a horizontal direction and working point is displayed far from the center. (d) Face of slope is displayed in a vertical direction and working point is not displayed.

Fig. 10: Evaluated images in this experiment



(a) $\alpha = 101.7^\circ$, $e_p = 77.7$, and $e_l = 92.5$ (b) $\alpha = 131.3^\circ$, $e_p = 76.8$, and $e_l = 80.1$ (c) $\alpha = 162.4^\circ$, $e_p = 57.8$, and $e_l = 57.8$ (d) $\alpha = 98.2^\circ$, $e_p = 0.00$, and $e_l = 97.1$

Fig. 11: Analyzed images in this experiment. Green and blue areas are planes, the yellow line is Face of slope and the red point is working point.

4.2 実験結果

本実験で撮影した画像を図 10 に示す。図 10(a) は法面が縦方向に表示されており作業箇所も画面中央付近に表示されている画像、図 10(b) は作業箇所は中央にあるが法面が傾斜している画像、図 10(c) は作業箇所が画面中央から離れており法面もほぼ横方向に表示されている画像、そして図 10(d) が法面は縦方向に表示されているが作業箇所が表示されていない画像である。

それぞれの画像の評価を行った結果、法面と作業箇所の検出が行われた状態の画像を図 11 に、得られた評価値を表 1 に示す。 E_{ver} について、画面縦方向に表示された図 10(a) と図 10(d) の画像の評価値はほぼ最大値を示し、傾きがある図 10(b) の画像の評価値はやや低めの値が、そして画面横方向に近い図 10(c) の画像の評価値は非常に低くなった。一方 E_{cen} については、図 10(a) の画像の評価値が最も高くなった。また、図 10(b) については作業箇所と画面中央との距離は図 10(a) とほぼ等しかったが、法面が少し離れていたため評価値は減少した。図 10(c) については作業箇所、法面ともに画面中央から離れていたため低い

Table 1: Evaluation results

Evaluation	(a)	(b)	(c)	(d)
E_{ver}	0.979	0.751	0.302	0.990
E_{cen}	0.851	0.784	0.578	0.000
E	0.833	0.589	0.175	0.000

評価値を示し、図 10(d) は法面は 4 枚の画像の中で最も画面中央に近かったが、作業箇所が表示されていないため、評価値は 0 を示した。最終的な評価値である E について、要求仕様をどれも十分に満たしている図 10(a) については大きな値を示し、どれも十分に満たしていない図 10(c) については低い値を、作業を行うことができない図 10(d) の評価は 0 を示した。この結果から、提案手法を用いて計算した評価値によって、表示されている画像がバックホウの盛土作業に適したものであるかどうかの分類が可能であることが確認できた。

5. 結言

建機の遠隔操作の作業効率低下を防ぐために、実際にカメラオペレータが行っている映像提供を自動化することは有効であると考えられ、そのためには現在提示されている映像が適切なものであるか否かを定量的に評価する手法が必要となる。本研究では、バックホウの盛土作業における遠隔操作のための映像に必要な要求仕様を整理し、画像データと LiDAR を用いた 3 次元距離情報を用いることで、映像評価を行う方法を構築した。実験では盛土作業を想定した映像を複数撮影し、それらに提案手法を適用させたところ各要求仕様を満たすか否かの評価を行うことができた。

今後の課題としては、実際の映像と 3 次元距離情報を用いて評価値の算出を行い、バックホウの盛土作業における遠隔操作の経験者の手動評価と比較することで、今回提案したアルゴリズムの有効性の検証を行う。また、今回の提案手法では、建機によって生ずる作業対象のオクルージョンやズーム倍率などの要素が考慮されていないため、それらに対する対処について考案する予定である。

参考文献

- [1] 茂木正晴, 藤野健一, 油田信一, “無人化施工におけるヒューマンインタフェースの作業効率評価”, 日本ロボット学会誌, vol. 33, no. 6, pp. 426–429, 2015.
- [2] K. Chayama, A. Fujioka, K. Kawashima, H. Yamamoto, Y. Nitta, C. Ueki, A. Yamashita and H. Asama: “Technology of Unmanned Construction System in Japan”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 26, no. 4, pp. 403–417, 2014.
- [3] 野末晃, 藤岡晃, 浅沼廉樹, 池内俊裕, 三鬼尚臣, 岡野幹雄, 山本新吾, “無人化施工技術の開発 Phase11”, フジタ技術研究報告, no. 48, pp. 73–78, 2012.
- [4] 新田恭士, “災害復旧に貢献する無人化施工技術”, 土木技術, vol. 67, no. 4, pp. 16–23, 2012.
- [5] 片野浩司, 橋本毅, 山田充, “軟弱地盤のトラフィカビリティを把握する土質調査試験について”, 建設施工と建設機械シンポジウム, pp. 9–12, 2016.
- [6] 塩野康浩, 小林浩, “有珠山 2000 年噴火時の防災に関する技術的な取組み”, 砂防学会誌, vol. 61, no. 1, pp. 46–52, 2008.
- [7] Y. Hiramatsu, T. Aono and M. Nishio: “Disaster restoration work for the eruption of Mt Usuzan using an unmanned construction system”, *Advanced Robotics*, vol. 16, no. 6, pp. 505–508, 2002.
- [8] A. Nishiyama, M. Moteki, K. Fujino and T. Hashimoto: “Research on the Comparison of Operator Viewpoints between Manned and Remote Control Operation in Unmanned Construction Systems”, *Proceeding of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IS-ARC 2013)*, pp. 677–684, 2013.
- [9] M. Kamezaki, J. Yang, H. Iwata and S. Sugano: “Visibility Enhancement using Autonomous Multi-camera Controls with Situational Role Assignment for Teleoperated Work Machines”, *Journal of Field Robotics*, vol. 33, no. 6, pp. 802–824, 2016.