

遠隔操作オペレータの要求仕様に基づいた バックホウ盛土作業のための映像自動提示*

筑紫彰太** 森山湧志*** 藤井浩光† 田村雄介†† 山川博司** 永谷圭司††
坂井郁也*** 千葉拓史*** 山本新吾*** 茶山和博††† 山下 淳** 浅間 一**

Automatic Video Presentation for Backhoe Embankment Construction Based on Remote Operator's Requirements

Shota CHIKUSHI, Yushi MORIYAMA, Hiromitsu FUJII, Yusuke TAMURA, Hiroshi YAMAKAWA, Keiji NAGATANI,

Yuya SAKAI, Takumi CHIBA, Shingo YAMAMOTO, Kazuhiro CHAYAMA, Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA

Construction work for disaster recovery is required in Japan where disasters occur frequently. Unmanned construction is a technology that can be utilized for safe construction by remotely operating an unmanned construction machine, without risk of secondary damage or danger to the humans involved in the disaster recovery. However, there exist problems such as low work efficiency, and, decline and lack of laborforce. Therefore, in this paper, we propose an automatic video presentation method for backhoe embankment construction that can solve these problems. In the proposed method, an analysis is done of the kind of video that the remote operator wants in order to extract the required specifications. Then, automatic control of the pan, tilt, and zoom of an external camera is performed based on the required specifications and the appropriate view is presented. The proposed method was evaluated quantitatively by experiments on actual equipment via visibility evaluation.

Key words: unmanned construction, automatic video presentation, backhoe embankment construction

1. 序 論

地震による土砂崩れや噴火による溶岩流、台風による河川の氾濫等、自然災害が発生した場合、迅速な災害対応が必要となる。しかしながら、2次災害の危険性から人間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、人の捜索や調査、被害の拡大を防ぐための緊急対応や中長期的な復興対応を行うため、遠隔操作型の無人建機やロボットを用いた災害対応が有効である。特に、復興対応のための無人化施工は、これまで、雲仙普賢岳をはじめ、中・長期的に2次災害の危険性がある火山活動地域や、河川氾濫地域で使用されてきた^{1)~3)}。その無人化施工における施工内容の1つに図1に示すダム建設のためのコンクリートを流し込む型枠の整形がある⁴⁾。型枠整形には、バックホウを用いた盛土作業が必要不可欠となり、この盛土作業は図2(a)に示す外部カメラ映像と図2(b)に示す車載映像に基づいて行われる。盛土作業は、旋回してバックホウ後方に置かれた土砂の掘削、バケットで土砂を締固め・整形、次の作業場所への移動の手順で行われる。また、このとき整形される型枠の形状に応じて、ダムの出来形が決まるため、盛土作業は、無人化施工において極めて重要な役割を果たす。これまで述べたように無人化施工は人間の安全を確保した災害復旧において有効な手段であり、使用されてきた。しかしながら、遠隔操作は搭乗操作と比較して土工事における作業効率が6割程度に落ち込む課題がある⁵⁾。その理由の1つとして、体性感覚による振動、聴覚による音等の情報が得られない遠隔操作においては、視覚情報が最も重要であるにも関わらず、カメラオペレータが建機オペレータ

の望む映像を適切に提供できていないことがある⁶⁾。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ものの、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。さらに、建設業は人材不足および高齢化が進んでおり、総就業者数は減少傾向にある。そのため、作業を自動化することで無人化施工の抱える問題を低減することは重要であり、災害対応のための無人化施工現場において、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。そこで、本研究は無人化施工における盛土作業のための映像自動提示に焦点を当てた。

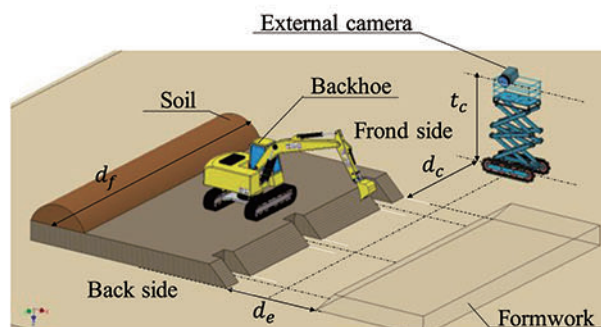


Fig. 1 Construction of embankment



(a) Sight of external camera (b) Sight of cabin camera
Fig. 2 Presentation of camera images to the construction machine operator

* 原稿受付 令和元年 05 月 10 日

掲載決定 令和元年 10 月 31 日

** 正 会 員 東京大学大学院 (東京都文京区本郷 7-3-1)

*** フジタ (神奈川県厚木市小野 2025-1)

† 千葉工業大学 (千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

†† 東京大学大学院

††† フジタ (東京都渋谷区千駄ヶ谷 4-25-2)

2. アプローチ

2.1 関連研究

これまでに無人化施工や災害対応ロボット等、遠隔操作のための映像提示技術に関する研究は様々行われてきた。建機オペレータが望む映像の提示について、Sato らは多数のカメラ配置から建設機械の遠隔操作を実施し、視認性の良いカメラ配置の許容範囲の抽出を行っている⁷⁾⁸⁾。しかし、この研究の被験者は学生であり、熟練者からの評価は行われていない。建設機械の操縦方法は熟練者と初心者では異なるため⁹⁾、この研究で抽出された許容範囲が、実際の無人化施工において建機オペレータが望む映像の条件を満たすか不明である。

Fujiwara らは、無人化施工における砂防ダム建設の土砂型枠整形を想定し、建機オペレータに提示された映像上に施工線を表示するシステムを構築した¹⁰⁾。しかし、この手法ではマーカ作成など前処理が必要であり、そのマーカ作成に専用の建設機械を使用しなければならない。

映像提示の自動化に取り組んだ研究としては、Kamezaki らは、多数の環境固定カメラの中から作業に適した映像を割り出して提供する手法を構築している¹¹⁾。しかし、この手法は撮影対象物の形状や位置が既知であるという前提のもとにシミュレータ上で行われているため、実環境において建設機械をどのように認識するかの考慮がなされていない。

Tang らは、バーチャルリアリティ空間を用いた遠隔操作型建設機械制御システムを提案しており、そのシステムの中でカメラの自動制御を行っている¹²⁾。しかし、この研究は現場が平地であることが前提とされているため、起伏のある施工現場に対応できない。

また、建設機械以外においても、ロボット遠隔操作のための映像提示について取り組んだ研究は数多く存在する。Lim らは、ズームアウトされたまま広域を観察するマスターカメラと、撮影対象物をズームして表示する別のカメラを組み合わせて自動追尾を行うシステムを構築している¹³⁾。しかし、この手法も撮影されている地面が平らであることが前提とされているため、地形が複雑かつ変化していく施工現場においては追尾を行うことができない。また、Liu らはグレースケールを用いて動体を認識し、自動制御を行っている¹⁴⁾。しかし、この手法では色の変化で物の動きを認識しているため、太陽や雲の動きにより日陰部分が変化する屋外利用には適していない。

ここまでで、建設機械やロボットの遠隔操作のための、映像提示について取り組んだ研究について述べた。無人化施工において建機オペレータがどのような映像を望むかの形式知化は行われておらず、また実際の無人化施工現場に対応可能な自動制御方法は未だ確立されていない。

これらの関連研究より、建機オペレータがどのような映像を望むかは明らかにされておらず、また、実際の無人化施工現場に対応可能な自動制御方法は未だ確立されていない。よって、本研究は、遠隔操作バックホウを用いた盛土作業におけるオペレータの要求を考慮した映像自動提示手法の構築を目的とする。

2.2 概要

本研究では、建機オペレータが望む映像を提示するために、実際の無人化施工現場において、盛土作業中の建機オペレータに提示される映像、オペレータの注視点、建機オペレータとカメラオペレータの音声を記録、解析、その結果に基づき、要求仕様を抽出した。抽出した要求仕様に基づき、盛土作業における締固・

整形と移動の作業を対象として、外部カメラのパン、チルト、ズームを制御、建機オペレータに映像を自動提示する。また、要求仕様に基いて外部カメラを自動制御するためにはバックホウのバケット、履帯、アームの関節の映像上の位置を認識する必要がある。外部カメラの自動制御を行うにあたって、Kamezaki らは建設機械のアーム関節角などの情報を利用していた¹¹⁾。しかしながら、これらは通常建設機械から得ることができないパラメータである。そこで本研究では、AR マーカの ArUco¹⁵⁾を用いてバックホウの姿勢の認識を行うこととした。ArUco は、入力画像に対して適応型閾値処理を行うことで、高速かつ照明条件の変化に対してロバストにマーカを検出できるツールである¹⁵⁾。そのため、バックホウにこの AR マーカを貼り付けるだけで、外部カメラから取得した画像情報のみから、背景の色や他の建設機械の存在、照明条件に影響されずに、バックホウの位置姿勢の認識を行うことが可能となる。以上のように本研究では、建機オペレータの要求を考慮した屋外環境における外部カメラ自動制御手法を新規に提案する。

3. 提案手法

3.1 遠隔操作のための映像の要求仕様の抽出

建機オペレータが望む映像を提示するためには、実際の無人化施工現場で建機オペレータがどの場面でのどのような外部カメラ映像を望んでいるのかを解析し、それらの映像の共通点や特徴を抽出する必要がある。そこで、実際に砂防ダムの建設が行われている雲仙普賢岳の無人化施工現場において作業の様子を記録、解析した。

3.1.1 要求仕様を満たす映像の定義

建機オペレータに提示する映像の要求仕様を得るためには、建機オペレータが望む映像（良い映像）とそうでない映像（悪い映像）を定義する必要がある。そこで、雲仙普賢岳の無人化施工現場において記録した“建機オペレータに提示される映像”と“建機オペレータとカメラオペレータの音声”より、良い映像と悪い映像を定義した。良い映像は建機オペレータからカメラオペレータに要請があり、カメラ操作された後に提示された映像とし、悪い映像は建機オペレータからカメラオペレータに要請があった直前の映像と定義した。

3.1.2 建機オペレータの注視点の解析

盛土作業では、バックホウの作業にも種類が存在する。そしてそれぞれの作業において建機オペレータが注視する箇所は異なる。そのため本研究では、盛土作業を行うバックホウの作業を締固・整形、移動、旋回の3つに分類した。締固・整形は、盛土作業の主となる、土砂型枠をバケットで叩き、締め固め、形を整える作業のことを指す。移動は、履帯を回転させバックホウを移動させる作業のことを指す。旋回は、バックホウを180°旋回させる作業のことを指す。これらの作業において、3.1.1 項で定義した良い映像に対し、建機オペレータの注視点をアイトラッカで計測した。アイトラッカは、建機オペレータの頭部に装着し、左右の瞳孔の動きを計測することで、映像中のどの箇所を注視しているのかを解析できる。その結果、移動の際は、バックホウを土砂型枠に対して平行に動かすために履帯を注視している場面が多くみられ、移動以外の作業においては、バケットが多く注視されていた。また、旋回においては、建機オペレータは他の作業以上に車載映像を注視して作業を行っており、さらに旋回先で行う土砂の掘削においては、車載映像以外、一切見ていないという結果が得られた。これは、外部カメラがバックホウの旋回先ま

で追尾を行っておらず、バックホウの作業機が映像中に提示されていなかったためである。よって、本研究においては、外部カメラ映像が必要となる締固・整形、移動の作業を対象として、履帯及びバケットが映像中どのような位置姿勢で提示されているかを解析した。この解析については、実際に提示されていた外部カメラ映像のうち、良い映像とされていたものをフレームごとに確認しバックホウの各部位の位置を抽出した。良い映像と悪い映像を見ているときにバックホウのバケットと履帯の提示されていた位置について解析した。解析は、図 2(a)に示すバックホウが左側を向いて盛土作業を行っている際の外部カメラ映像を用いた。この外部カメラ映像は、図 3 に示す uv 座標系で表され、解像度は 720×480 である。解析のため、図 3 に示すバケット位置と履帯位置が良い映像と悪い映像を見ているときに示された位置を記録した。その結果を図 4, 5 に示す。図 4, 5 は、赤丸が良い映像を見ているときのそれぞれの位置、青クロスが悪い映像を見ているときのそれぞれの位置を示す。これらのデータを解析した結果、バケットについて、パン、チルト制御では、悪い映像では画面端に表示されていたところ、良い映像では画面中央付近に提示されるようにカメラが制御されていた。また、ズームについては悪い映像と良い映像どちらも画面中央付近の同じような位置にバケットが提示されており、バケット付近を中心としたズームが行われていた。履帯について、パン、チルト、ズームどの制御が行われた場合でも、悪い映像では画面右側中央以外に提示されていたのに対し、良い映像では全て画面右側中央に提示されるように制御されていた。特に、ズームにおいてはバケットの位置はそのままであったのに対し、履帯が画面右

側中央に映るように制御されていた。バケットと履帯以外について、まず、注視はされていないがアーム関節については、悪い映像では画面から見切れて提示されていないことが多かったことに対し、良い映像では必ず映像中に提示されていた。

3.1.3 抽出された要求仕様

バックホウの盛土作業における遠隔操作のための映像の要求仕様を、以下の通りにまとめる。

1. 土砂型枠側の履帯が、画面右側中央に提示されている
2. バケットが、画面中央付近に提示されている
3. アームの関節が、映像中に提示されている

1 点目について、建機オペレータは土砂型枠整形を行うときに履帯を定規代わりの目印とし、移動時には型枠と平行に移動するため外部カメラ映像で履帯の位置を確認していた。また、図 5 に示すように、パン、チルト、ズームどの制御においても、悪い映像では履帯の位置が画面内に散っていたのに対し、良い映像では全て、図 2(a)に示すように画面右側中央に収まるようカメラ制御が行われていた。加えて、図 4(c) でバケットが画面左上に表示された状態で良い映像とされていたのに対し、図 4(a) ではバケットがそれより画面中央に近い位置に表示されていたにも関わらず悪い映像とされていた。これらの違いは、そのとき履帯が画面右側中央に表示されていたか否かであるため、履帯の表示位置はバケットの表示位置以上に優先度の高い重要なものであるといえる。

2 点目について、図 5(a) と図 5(c) は、どちらも履帯を画面右側へと移動させているが、使用したカメラ制御は図 5(a) ではパン、図 5(c) ではズームと別の制御が用いられている。それぞれ違う制御が用いられた理由として、図 5(a) で履帯を画面右側へと動かすためにパンではなくズームを行った場合、建機オペレータが外部カメラ映像で最も注視していたバケット部分が画面外へと出てしまう。また、図 4(c) でズームではなくパンを行った場合、バケットは画面内に提示され続けるが、この位置は、図 4(a)の良い映像においてバケットが提示されている位置と異なる座標となってしまう。このことから、図 2(a)に示すようにバケットを画面中央付近に提示することは、履帯の提示位置の次に重要な要求仕様であるといえる。

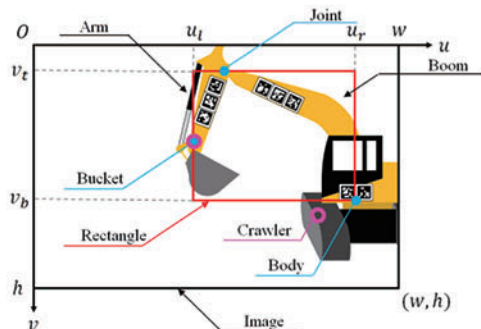


Fig. 3 Position of backhoe in uv coordinate system

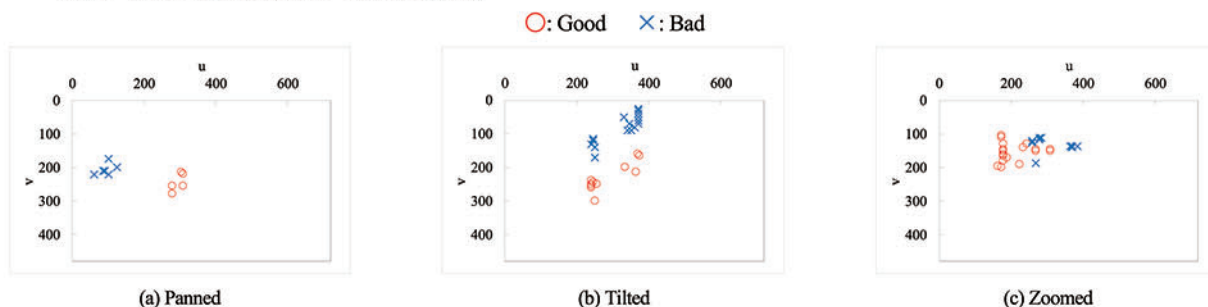


Fig. 4 Positions of bucket

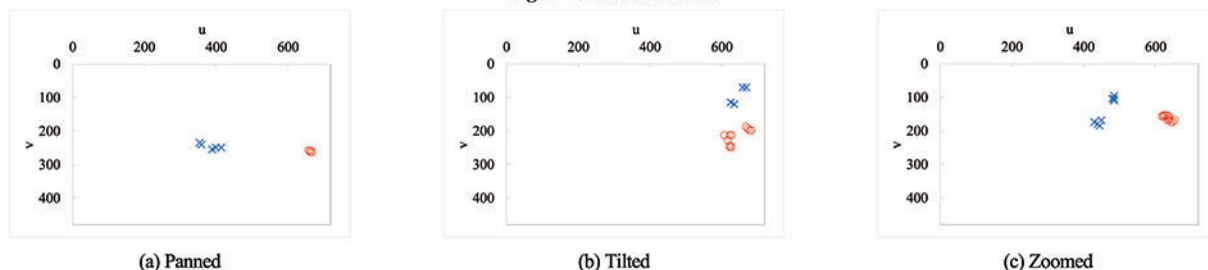


Fig. 5 Positions of crawler

3 点目について、建機オペレータの注視点以外に着目してみると、悪い映像ではアーム関節が提示されていないことが多かったのに対し、良い映像では図 2(a)に示すように必ず提示されていた。一方、建機オペレータの指示なしでカメラオペレータが独断で行ったカメラ制御後では、アーム関節が提示されていない場面が多くみられた。このことから、アーム関節は提示されていなくとも作業を行うこと自体は可能ではあるが、より作業を行いやすい視認性の良い映像を得るためには必要な要素であると考えられる。

3.2 外部カメラ自動制御

本節では、3.1 節で述べた要求仕様を満たす外部カメラの自動制御を行うアルゴリズムについて述べる。まず、外部カメラの配置について、雲仙の無人化施工現場では外部カメラの位置は予め決められており、図 1 に示すように、外部カメラは土砂型枠の 2 本の盛土の中心に設置されていた。そのため本手法においても外部カメラは土砂型枠の延長線上に設置され、バックホウが盛土作業を行っている方向は既知である前提条件とする。

3.2.1 バックホウ認識のための外部カメラ自動制御

バックホウの認識は図 3 に示す AR マーカを用いて行う。バケット、アーム関節はそれぞれ、バックホウのアーム、ブームに取り付けたマーカから認識する。履帯の認識については、履帯との位置関係が変わらないバックホウ本体に AR マーカを貼り付け、その位置を代わりに認識する。各マーカの認識において、カメラが過剰にズームされていた場合、カメラはマーカを認識できない。そのため提案手法では、映像中の建機の大きさは画面縦方向と横方向の両方を考慮する。そこで、要求仕様の要素であるバケット、アーム関節、バックホウ本体それぞれの u 座標と v 座標の最大値と最小値から、図 3 に赤実線で示したような長方形を作成する。この長方形は、右辺の u 座標 u_r 、左辺の u 座標 u_l 、上辺の v 座標 v_t 、そして下辺の v 座標 v_b で表され、 $w=720$ 、 $h=480$ は映像の解像度、 p_l および P_r は右辺と左辺の横方向の表示範囲の最小値および最大値、 t および T は下辺の縦方向の表示範囲の最小値および最大値、 z および Z は長方形の高さの縦方向の表示範囲の最小値および最大値を表し、3.1.2 項で解析した結果から表 1 に示す値を適用する。このとき、その長方形の高さと画面の縦の大きさをもとに長方形の上辺 v_t が式(1)を満たすようにズーム制御する。

$$v_b - Zh < v_t < v_b - zh \quad (1)$$

このバケット、アーム関節、バックホウ本体の 3 点の認識、長方形の作成、ズーム制御ができた状態を初期状態とする。

3.2.2 盛土作業のための外部カメラ自動制御

盛土作業のための外部カメラ自動制御では、初期状態から盛土作業のためのカメラ制御を行う。まず、長方形の左辺 u_l が式(2)を満たすようパン制御を行う。

$$p_{lw} < u_l < P_{lw} \quad (2)$$

パン制御によって長方形の左辺 u_l が式(2)を満たした場合、次に、長方形の右辺 u_r が式(3)を満たすようズーム制御する。

$$p_{rw} < u_r < P_{rw} \quad (3)$$

このとき、長方形の左辺 u_l と同様にパン制御を行った場合、長方形の左辺 u_l が式(2)を満たさなくなってしまう。そこで、長方形の左辺 u_l が式(2)を満たしたまま右辺 u_r が式(3)を満たすようズーム制御する。右辺 u_r が式(3)を満たした場合、長方形の下辺 v_b が式(4)を満たしているかの確認を行う。

$$th < v_b < Th \quad (4)$$

長方形の下辺 v_b が式(4)を満たしていない場合はカメラを上方向にチルト制御する。式 (2)から式(4)までの全ての条件式を満たした場合、要求仕様を満たす映像を提示できているとみなし、カメラは動かさずそのままの位置に留める。これらの処理をカメラから送られてきた各フレームで行う。

4. 実験

4.1 実験環境

実験環境について、カメラとバックホウおよび盛土の位置関係を図 1 に示す。各パラメータは、土砂型枠幅 d_f を 15 m、盛土間距離 d_s を 6 m、土砂型枠とカメラ間距離 d_c を 20 m、地面からのカメラ高さ t_c を 3 m とし、2 本の盛土中心に外部カメラ、バックホウの後方に盛土用の土砂を設置した。遠隔操作室内では、建機オペレータの左手側には図 6(a)に示す外部カメラ映像、右手側には図 6(b)に示す車載映像を提示し、実験ではこれら 2 つの映像を見ながらバックホウの遠隔操作を行った。また、これらの環境、パラメータは全て雲仙の無人化施工現場に基づいて設定した。

4.2 実験方法

本実験では、第 3 章にて構築した自動制御システムを評価するために、遠隔操作によるバックホウの盛土作業を、自動制御システムとカメラオペレータの手動制御による 2 通りの外部カメラ映像を用いて行い、それらの作業時間および映像の視認性を比較した。そのため、本実験では実際に盛土作業による土砂型枠整形を行った。このときのバックホウの動きを図 7 に示す。実験では、図 1 に示すような歯抜けの土砂型枠を用意し、抜けた



(a) External camera image (b) Cabin camera image

Fig. 6 Camera image

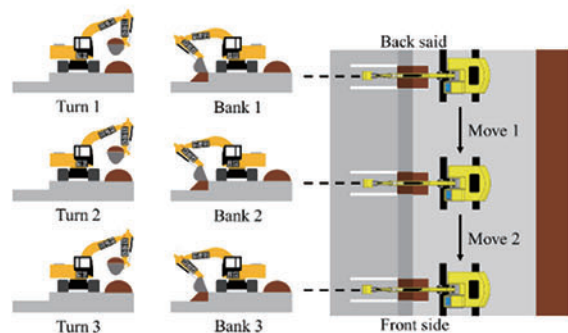


Fig. 7 Scenes of experiment

Table 1 Parameters of proposed method

Parameter	Value	Parameter	Value
w	720	h	480
p_l	0.75	P_l	1.00
p_2	0.25	P_2	0.60
t	0.00	T	0.80
z	0.00	Z	0.50

箇所の土砂型枠の整形作業をバックホウで行った。また、3.1.2 項で述べたように実験では盛土作業における一連の作業を行うものの評価は外部カメラが必要とされる締固・整形と移動を対象とした。本実験の被験者は、建設機械の遠隔操作の経験を有する熟練建機オペレータ 2 名、熟練カメラオペレータ 1 名で行った。各建機オペレータには、車載映像と自動制御システムによる外部カメラ映像と、車載映像とカメラオペレータの手動制御による外部カメラ映像において、カメラ手前側からの移動と奥側からの移動の双方の作業を記録した。

4.3 実験結果

各条件における、被験者 A の作業時間を表 2 に、被験者 B の作業時間を表 3 に示す。また、本実験では 3 ヶ所で型枠整形作業を行っているため、一連の作業を図 7 に示すように、締固・整形 1→移動 1→締固・整形 2→移動 2→締固・整形 3 の場面に分類した。被験者 A、被験者 B の場面ごとの所要時間について、それぞれ図 8(a), (b) に示す。被験者 A について、自動制御と手動制御の平均作業時間はどちらも 9 分 30 秒程度とほぼ同じ時間を要した。締固・整形では作業ごとに時間のばらつきがあり、外部カメラ映像の制御方法との相関関係は見られなかった。表 4 に締固・整形の所要時間とそのときバケットで型枠を叩いた回数についてまとめる。締固・整形 3 における、奥側から手前側への手動制御が突出して長い作業時間を示しており、型枠をバケットで叩く回数が最も多かった。一方、例えば締固・整形 1 における、手前側から奥側への自動制御は、バケットで叩く回数が 14 回と少ないのに対し 113 秒とやや長めの作業時間を要して

Table 2 Result of subject A

Direction	Auto	Manual
Front → Back	570 s	528 s
Back → Front	575 s	619 s

Table 3 Result of subject B

Direction	Auto	Manual
Front → Back	712 s	585 s
Back → Front	719 s	712 s

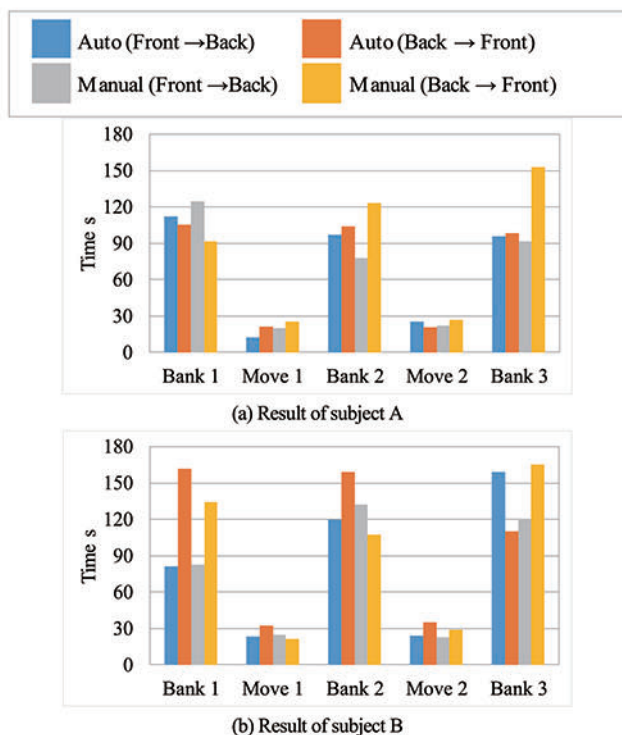


Fig. 8 Experimental result

いる。これについてはバケットで叩く作業とは別に、盛土からあふれた土砂を払う動作が行われたことが要因である。移動では、移動 1 における、手前側から奥側への自動制御が他の結果と比較して短い結果が得られた。これは建機オペレータがこのときのみバックホウのギアを上げ移動速度を上げたことに起因している。その他 7 つはどれも作業時間に差異はなく、自動制御と手動制御の差はないと考えられる。

被験者 B について、手動制御の手前側から奥側方向への作業のみ 9 分 45 秒と作業時間が短く、他 3 つの作業では全て 12 分弱要したという結果が得られた。締固・整形では、被験者 A と同様に時間のばらつきが大きく、外部カメラ映像の制御方法との相関関係は見られなかった。表 5 に、締固・整形の所要時間とそのときバケットで型枠を叩いた回数についてまとめる。こちらも最も作業時間を要したときに型枠をバケットで叩く回数が多いことが示された。締固・整形 2 における、奥側から手前側への自動制御では、直前に移動においてバックホウが土砂型枠に対して平行ではなく斜め方向を向いてしまったため、その姿勢の修正のため所要時間が増加していた。移動では、移動 2 における、奥側から手前側への自動制御に最も長い時間を要した。これは、直前の締固・整形作業中にバックホウ本体が型枠に対して斜めを向いてしまったため、その向きの修正を行っていたのが原因である。また、どちらも同じ形状の土砂型枠が作成されており、外部カメラの操作による映像の違いによる出来形の違いはないことが確認できた。以上の結果から、提案手法による自動制御システムは、従来のカメラオペレータによる手動制御と同等の作業時間で盛土作業を行うことができた。

4.4 ヒアリングによる視認性の評価

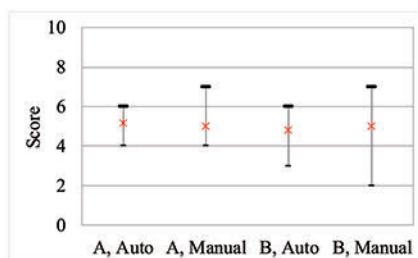
ヒアリングによる締固・整形、移動の視認性の評価結果をそれぞれ図 9(a), (b) に示す。評価は 10 点満点で行われており、高い数字が良い視認性を表す。締固・整形については、自動制御、手動制御どちらも視認性の評価に差異が見られない結果となった。評価の低かった映像は、カメラのパンチルトズームの制御が頻繁に行われたもので、画面が小刻みに動きすぎたことが要因であるという指摘を受けた。特に、自動制御の中で最も評価の低かった「被験者 A 締固・整形 2 における手前側から奥側への自動制御の映像」を解析した結果、締固・整形作業時間 98 秒の間にズーム制御が 3 回、パン制御が 5 回行われていた。これに対し、同区間における手動制御による映像を解析した結果、締固・整形作業時間 78 秒の間にズーム制御は同様に 3 回行われていたが、パン制御については、1 回のみであった。なお、移動については、外部カメラ映像の制御方法と視認性の評価の間には、相関関係は見られなかった。一方、バックホウの移動方向が画面手前側から奥側か、あるいは奥側から手前側かという、バックホウの進行方向と視認性の評価の間に相関関係が見られた。バックホウの進行方向と視認性を比較したグラフを図 9(c) に示す。画面手前側から奥側へ進むときと比較して、奥側から手前側へと進むときは評価が低いという傾向がみられる。これは、手前側から奥側へと進む場合は、映像中のバックホウの大きさは小さくなるためバックホウが画面内に収まり続けるのに対し、奥側から手前側へと進む場合は、映像中のバックホウのサイズは大きくなるため、バックホウの本体後方が画面から見切れてしまい周囲の安全が確認しきれないことに起因する。以上の結果から、建機オペレータの要求仕様に基づいた自動制御システムは、従来のカメラオペレータによる手動制御と同等の視認性を得ることができた。

Table 4 Number of tapping of subject A

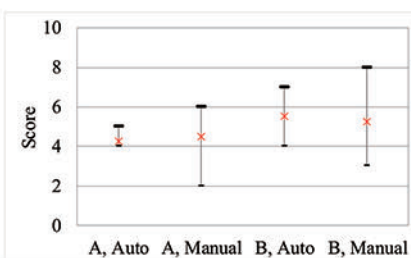
Scene	Control	Direction	Time	Number of tapping
Bank 1	Auto	Front → Back	113 s	14
Bank 1	Auto	Back → Front	106 s	16
Bank 1	Manual	Front → Back	125 s	17
Bank 1	Manual	Back → Front	92 s	18
Bank 2	Auto	Front → Back	98 s	15
Bank 2	Auto	Back → Front	104 s	20
Bank 2	Manual	Front → Back	78 s	11
Bank 2	Manual	Back → Front	123 s	19
Bank 3	Auto	Front → Back	96 s	14
Bank 3	Auto	Back → Front	99 s	20
Bank 3	Manual	Front → Back	91 s	12
Bank 3	Manual	Back → Front	153 s	26

Table 5 Number of tapping of subject B

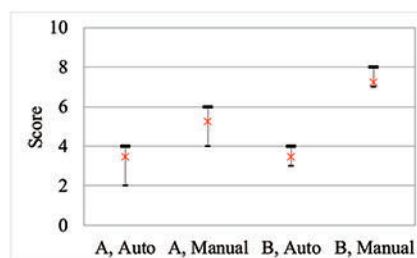
Scene	Control	Direction	Time	Number of tapping
Bank 1	Auto	Front → Back	81 s	11
Bank 1	Auto	Back → Front	162 s	28
Bank 1	Manual	Front → Back	83 s	14
Bank 1	Manual	Back → Front	134 s	18
Bank 2	Auto	Front → Back	120 s	25
Bank 2	Auto	Back → Front	160 s	26
Bank 2	Manual	Front → Back	133 s	21
Bank 2	Manual	Back → Front	108 s	24
Bank 3	Auto	Front → Back	159 s	33
Bank 3	Auto	Back → Front	110 s	21
Bank 3	Manual	Front → Back	120 s	20
Bank 3	Manual	Back → Front	166 s	33



(a) Bank



(b) Move



(c) Move by direction

Fig. 9 Result of evaluation

4.5 考 察

作業時間については、外部カメラ映像の提示方法との相関関係は見られなかった。最も時間のばらつきが大きい締固・整形においては、バケットが型枠を叩く回数が場面によって差がみられた。これについて考えられる要因の1つとして、掘削して持ってきた土砂の量が、型枠の歯抜け部分の容積に対して過不足があったことが挙げられる。すなわち、バケットが適切な土量を掘削できたかが把握しやすくなれば、型枠に適切な土量が供給され、型枠整形に要する時間の短縮が図れる可能性が考えられる。映像の視認性については、締固・整形と移動に関してカメラオペレータの手動操作と同等の映像提供に成功した。しかしながら、カメラのパンチルトズーム制御の頻度においては課題がある。本実験において、画面が小刻みに動きすぎることが指摘され、自動制御の中で評価が最も低かった、被験者Aの締固・整形2における、手前側から奥側へのカメラのパンチルトズームに関する自動制御と手動制御の制御回数を比較した際、自動制御では、9.7秒の間にズーム制御が1回、パン制御が4回連続して発生したため、画面が小刻みに動く映像が提示され、この動きによって評価が下がったと考えられる。そのため、カメラのパンチルトズームの制御が頻繁に行われ、画面が小刻みに動きすぎる課題を改善することで、カメラオペレータの手動制御より良い映像が今後提供できるようになる可能性が考えられる。

5. 結 論

本研究では、遠隔操作バックホウを用いた盛土作業におけるオペレータの要求を考慮した映像自動提示手法を構築した。建機オペレータに提示する外部カメラ映像の要求仕様の抽出において、実際の無人化施工現場でオペレータの様子、作業中のやりとり、提示されている映像、建機オペレータの注視点の記録、解析を行った。得られたデータを解析することで、バックホウの盛土作業における遠隔操作のための、外部カメラ映像の要求仕様を抽出した。外部カメラの自動制御において、AR マーカを用い

て映像中のバックホウの位置姿勢を認識し、要求仕様に基づき、カメラのパン、チルト、ズームを制御するアルゴリズムを構築した。構築したアルゴリズムの有効性を確認するために、屋外においてバックホウの遠隔操作による盛土作業を行った。その結果、構築した自動制御システムによる外部カメラ映像を用いた作業と、カメラオペレータの手動操作による外部カメラ映像を用いた作業では、同等の作業時間が得られた。また、それぞれの映像の視認性についてヒアリングを行った結果、バックホウの移動においては、従来のカメラオペレータの手動操作と同等の映像を提示することができた。締固・整形においては、提示した映像の1部分で画面が小刻みに動くことが指摘されたものの、その時間は締固・整形に要した10%未満であり、従来のカメラオペレータの手動操作と同等の評価が得られた。

よって、無人化施工における盛土作業のための映像提示において、本研究で構築した外部カメラ自動制御システムの有効性を示した。

将来の展望として、カメラ制御の頻度および反対側の型枠への移動等、対応可能範囲を拡張させ、より実環境を想定した自動制御手法を検討した後に実際の無人化施工現場での運用を目指す。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP18K13810 の支援を受けた。

参 考 文 献

- 1) 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*, **26**, 4 (2014) 403.
- 2) 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り組み, *砂防学会誌*, **61**, 1 (2008) 46.
- 3) Y. Hiramatsu, T. Aono and M. Nishio: Disaster Restoration Work for The Eruption of Mt Usuzan Using An Unmanned Construction System, *Advanced Robotics*, **16**, 6 (2002) 505.
- 4) 古賀省三, 茶山和博, 須郷茂夫, 池内俊裕, 倉谷勝敏: 雲仙・普賢岳における鋼製スリット砂防えん堤工事の無人化施工, *ダム工学*, **13**, 4

- (2003) 229.
- 5) 新田恭士: 災害復旧に貢献する無人化施工技術, 土木技術, **67**, 4 (2012) 16.
- 6) 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 (2013) 677.
- 7) R. Sato, M. Kamezaki, S. Niuchi, S. Sugano and H. Iwata: Derivation of an Optimum and Allowable Range of Pan and Tilt Angles in External Sideway Views for Grasping and Placing Tasks in Unmanned Construction Based on Human Object Recognition, Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on System Integration (2019) 776.
- 8) R. Sato, M. Kamezaki, M. Yamada, T. Hashimoto, S. Sugano and H. Iwata: Experimental Investigation of Optimum and Allowable Range of Side Views for Teleoperated Digging and Release Works by Using Actual Construction Machinery, Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on System Integration (2019) 788.
- 9) Y. Sakaida, D. Chugo, K. Kawabata, H. Kaetsu and H. Asama: The Analysis of Excavator Operation by Skillful Operator, Proceedings of 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (2016) 543.
- 10) N. Fujiwara, T. Onda, H. Masuda and K. Chayama: Virtual Property Lines Drawing on the Monitor for Observation of Unmanned Dam Construction Site, Proceeding IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, **41**, 4 (2000) 101.
- 11) M. Kamezaki, J. Yang, H. Iwata and S. Sugano: Visibility Enhancement using Autonomous Multicamera Controls with Situational Role Assignment for Teleoperated Work Machines, Journal of Field Robotics, **33**, 6 (2016) 802.
- 12) X. Tang, H. Yamada: Tele-operation Construction Robot Control System with Virtual Reality Technology, Procedia Engineering, **15** (2011) 1071.
- 13) S. N. Lim, A. Elgammal and L. S. Davis: Image-Based Pan-Tilt Camera Control in a Multi-Camera Surveillance Environment, Proceedings of the International Conference on Multimedia and Expo, 1 (2003) 645.
- 14) D. H. Liu, X. Y. Sun, L. Q. Feng and A. H. Li: Intelligent Pan-Tilt Control System of Two Cameras Based on Gray-Scale Image Matching, Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 1 (2007) 454.
- 15) S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas and M. J. Marin-Jimenez: Automatic Generation and Detection of Highly Reliable Fiducial Markers under Occlusion, Pattern Recognition, **47**, 6, (2014) 2280.