

無人化施工用俯瞰映像提示システムの開発

佐藤 貴亮^{*2}, 藤井 浩光^{*2}, Alessandro Moro^{*2,*3}, 杉本 和也^{*2},
野末 晃^{*4}, 三村 洋一^{*4}, 小幡 克実^{*4}, 山下 淳^{*1}, 浅間 一^{*5}

Development of bird's-eye view system in unmanned construction

Takaaki SATO^{*2}, Hiromitsu FUJII^{*2}, Alessandro MORO^{*2,*3},
Kazuya SUGIMOTO^{*2}, Akira NOZUE^{*4}, Yoichi MIMURA^{*4},
Katsumi OBATA^{*4}, Atsushi YAMASHITA^{*1} and Hajime ASAMA^{*5}

^{*1,*2,*5} Department of Precision Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

^{*3} Ritecs

3-5-11 44 Shibasaki, Tachikawa-shi, Tokyo 190-0023, Japan

^{*4} Fujita Corporation

4-25-2 Sendagaya, Shibuya-ku, Tokyo 151-8570, Japan

Received 4 January 2015

Abstract

This paper describes a development of bird's-eye view system for teleoperation. Emergent disaster recoveries are important when natural disasters occur. Unmanned construction is used to recover from natural disasters such as landslide and pyroclastic flow. This construction method has no risk of secondary disaster because workers teleoperate construction machines at remote site. However, traditional unmanned construction is an inefficient way because captured images from a camera mounted on a construction machine usually has blind spots. We propose an easy calibration method to create bird's-eye view images which can reduce blind spots from multiple cameras. Our method helps workers understand environment easily and operate construction machines safely. We evaluate working efficiency by integrating our bird's-eye view system into actual unmanned construction systems under actual field conditions.

Key words : Unmanned construction, Bird's-eye view, Teleoperation, Disaster recovery, Fish-eye camera

1. はじめに

2011年の東日本大震災をはじめとし、我が国では土砂災害や火山噴火などの自然災害が多数発生している。これら被害を最小限に留めるためには災害発生直後の緊急対応が極めて重要となるが、その一方で災害区域での有人作業には二次災害の危険性が指摘されている。この観点から、現在ではオペレータが安全な遠隔地から建機を操作する無人化施工の技術導入が盛んに進められている(馬場, 久米, 2008 など)。

しかし、無人化施工は遠隔操作による作業のため有人作業と比べて作業効率が低くなる問題がある。山口ら(山口他, 2004)の調査によれば、その要因として視覚の問題が29%と最も高く、その中でも後述のカメラ位置の問題

論文 No.14-00031 [DOI: 10.1299/transjsme.14-00031]

^{*1} 正員, 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)

^{*2} 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻

^{*3} (有) ライテックス (〒190-0023 東京都立川市柴崎町 3-5-11)

^{*4} (株) フジタ (〒151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷 4-25-2)

^{*5} 正員, フェロー, 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻

E-mail of corresponding author: satoh@robot.t.u-tokyo.ac.jp

が44%と最も高い。よって、無人化施工での作業効率を高めるためには上記の課題解決が極めて重要である。

視覚関連の課題を解消するために従来的に無人化施工でとられている手法がカメラを搭載した車（以降、カメラ車）による映像提示である。林ら(林他, 2009)は油圧ショベルの前方にカメラを設置すると共に、カメラ車を油圧ショベルを眺めて撮影できる位置に配置して、それらの映像を組み合わせ提示している。このカメラ車映像は視点が第三者視点であり映像に環境だけでなく建機も映りこむため、建機と掘削対象物との遠近感を把握しやすい。また、カメラ車を適宜移動することで前方のカメラで死角となる領域も補うことができる。

しかし、実際の現場ではこの映像を得るためだけにカメラ車が必要となり、その分手間やコストが必要となる。さらに、建機の移動や作業に伴ってカメラ車の移動調節が必要となり、その作業には作業員の熟達求められる。緊急災害対応の観点では更に大きな問題としてカメラ配置の問題がある。具体的には、災害直後の作業現場では土石や瓦礫の散乱した状況が考えられるが、その際に環境が複雑で狭いといった地形的な制限からカメラ車の適切な配置ができない。効率良く緊急災害対応を行うためには、このカメラ車配置の問題が大きな制約となる。

古屋ら(古屋他, 2012)は無人化施工用に建機の姿勢に応じて傾く操縦席や3D映像による体感型操作環境を構築している。この手法は災害後の計画的な復旧には向いているが、システムが簡易ではなく準備面で緊急災害対応には向かない。一方、藤本ら(藤本他, 2003)はオペレータが携帯可能なコントローラを操作することにより、建機に搭乗させたロボットで建機を遠隔操縦する無人化施工用の操縦ロボットシステム(ロボQ)を提案している。このシステムでは、実際の建機の操作レバーをロボットの空気圧制御により動かし操縦している。そのため、建機の内部システムに依存せずメーカーや機種を問わず装着できるという利点を持ち、現場付近で調達可能な建機での災害対応が可能である。緊急災害対応では、施工準備における簡便性は極めて重要であり、この利点から本研究でも操縦系にはロボQを利用する。

以上の問題を解決するために本研究では俯瞰映像提示手法を提案する。図1に俯瞰映像提示システムのコンセプトを示す。このシステムは建機に複数のカメラを設置してそれらの映像を提示するとともに、提案手法で後述する変換処理によって建機を仮想的に上空から眺めたような俯瞰映像を生成して作業員へ提示を行う。この俯瞰映像はカメラ車映像と同様の第三者視点であるため、遠近感や死角の問題を解決できる。さらに、カメラは建機に設置されているので、環境の狭さや複雑さに制限を受けず周囲を提示できる。以上から従来のカメラ車映像による作業に比べ、さらに効率の良い災害対応が期待できる。

俯瞰映像に関しては車の駐車操作支援のための研究開発が行われている(Liu, et al., 2008, 金岡他, 2008, Shimizu, et al., 2010)。また、筆者らもこれまでに災害対応ロボットの遠隔操作のための時空間型俯瞰映像を提案している(佐藤他, 2012, Sato, et al., 2013)。しかし、これらの手法では俯瞰映像を生成するための具体的なキャリブレーション手法が提案されていない。文献(浅利他, 2007, 岡本他, 2013)は車の俯瞰映像を生成するキャリブレーション手法を提案しているが、設置する複数のカメラの位置と姿勢、相対関係を既知としてキャリブレーションを行うためカメラを厳密に設置しなければならず、準備の面で緊急災害対応には向かない。また、現場で用いられる建機のサイズや形状が想定と異なれば、俯瞰映像を生成することはできない。そこで、本研究では無人化施工のための俯瞰映像生成手法として、カメラの位置姿勢や建機のサイズ、形状に対して厳密な制限なしに作業現場で簡便に俯瞰映像を生成できるキャリブレーション方法を提案する。

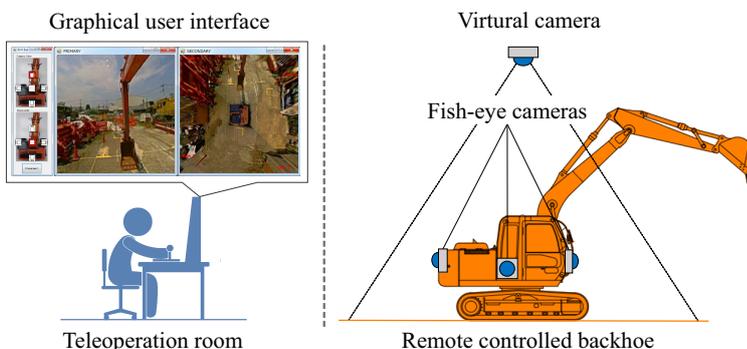


Fig. 1 Concept of bird's-eye view system.

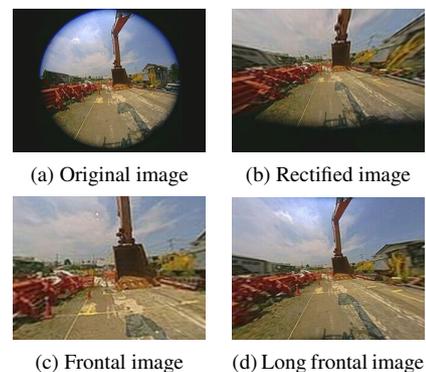


Fig. 2 Rectification of fish-eye image.

また、この手法をシステムとして遠隔操縦ロボットを搭載した油圧ショベルに組み込み、無人化施工の熟練者を被験者として実機検証を行う。検証結果より俯瞰映像を用いた作業についての操作性評価を行う。

2. 提案手法

本研究では建機の前後左右に魚眼カメラを取り付け、俯瞰映像生成のキャリブレーションを行う。その手順として、まず取得した魚眼映像の魚眼レンズによる撮像特有の歪みを補正する。次に歪み補正後の映像を擬似的に真上から撮影した俯瞰映像へ変換する。最後に各俯瞰映像を繋ぎ合わせる処理により全周囲の俯瞰映像とする。キャリブレーション後は得られたパラメータを用いて俯瞰映像を生成し、更に遠隔操作作用の映像として、臨場感を向上させるための映像処理を行う。

2.1 魚眼映像の歪み補正

歪み補正は Hughes ら (Hughes, et al., 2010) の手法を参考に行う。魚眼カメラは魚眼レンズによる撮像特有の歪みを持つ反面、画角が 180 前後と広いため一度に広い領域を撮影できるカメラである。油圧ショベル前方に設置した魚眼カメラの映像を図 2(a) に示す。このように魚眼映像は撮影領域が歪められて映像の円形部におさまるような映像となる。俯瞰映像生成では魚眼映像の一部領域について円形の歪みを取り除き、通常のピンホールカメラで撮影したような映像へ補正を行う。その歪み補正後の映像を図 2(b) に示す。俯瞰映像では油圧ショベルの真下を死角なく表示する必要があるため、歪み補正領域は撮影された環境の最下部を含めた領域としている。

また、歪み補正によって無人化施工で従来使用されてきたカメラ映像も擬似的に生成できる。図 2(c) に示すように魚眼カメラの中心部を歪み補正の領域とすることで、建機の前方に通常のカメラを搭載した際の映像の代替を作り出すことができる。さらに、歪みを残すものの上下の画角を広く取ることで図 2(d) に示すように油圧ショベルのアームを表示できるような映像も生成可能である。このように本手法は魚眼カメラのみの構成から俯瞰映像だけでなく、作業の種類に応じて必要となる映像の生成も同時に行うことが可能である。

2.2 各俯瞰映像の生成

歪み補正後に各映像を真上の視点から見たような映像に変換する。この変換処理は文献 (浅利他, 2007, 岡本他, 2013) の手法を参考の実装を行っている。変換処理では射影幾何学のホモグラフィ行列を使用する。ホモグラフィ行列は 3 次元上の空間のある平面を別の平面へ射影する際に作用させる行列である。本研究では求めるべきホモグラフィ行列を $\mathbf{H}_{\text{top}k}$ と定義する。 k は各カメラを区別する添字である。

俯瞰映像の生成は半自動のキャリブレーションにより行われる。キャリブレーションは正方形のパターンを複数個用意して行う。手動となる作業は図 3(a) に示す建機周囲の地面への複数の正方形のパターン設置、および取得した各魚眼映像上でのパターンの頂点位置の取得のみである。頂点位置の取得は PC でマウスクリック入力により行う。以後、自動で俯瞰映像が生成される。なお、パターン設置の際には次節の統合処理のために位置を考慮する必要がある。具体的には、隣り合うカメラと 1 つ以上のパターンを共有して撮影する必要がある。例えば図 3(b) では、左下の黒いパターンは建機の後方と左方のカメラが共有して撮影している。また、パターンの数は最低でもカメラ台数以上必要であるが、歪み補正後の映像は完全に補正されているわけではないため、図 3(b) の白いパターンのようにできるだけ撮影領域に多くパターンを設置することが望ましい。

各俯瞰映像生成処理の手順を図 3(c) に示す。このようにホモグラフィ行列を与えながら映像上の地面に置かれた複数の正方形パターンの形状を評価してホモグラフィ行列を推定する。ここで、各パターンの頂点座標を $\mathbf{p}_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j})$ と表す。添字の i は映像上で左から数えて何個目のパターンかを意味しており、 j は四角形の頂点が左上から時計回りに番号順で記されている。

まず、ホモグラフィ行列と入力座標、出力座標との対応を考える。入力座標を含む行列 $\mathbf{P}_{i,j} = [x_{i,j}, y_{i,j}, 1]^T$ を用いて行列 $\mathbf{M}_{i,j} = [m_x, m_y, m_z]^T \equiv \mathbf{H}_{\text{top}} \mathbf{P}_{i,j}$ を定義する。ここで簡単のためカメラを区別する k は省略している。出力座標 $\mathbf{p}'_{i,j} = (x'_{i,j}, y'_{i,j})$ は以下の行列 $\mathbf{P}'_{i,j} = [x'_{i,j}, y'_{i,j}, 1]^T$ から求められる。

$$\mathbf{P}'_{i,j} = \frac{\mathbf{M}_{i,j}}{m_z} = \frac{\mathbf{H}_{\text{top}} \mathbf{P}_{i,j}}{m_z} \quad (1)$$

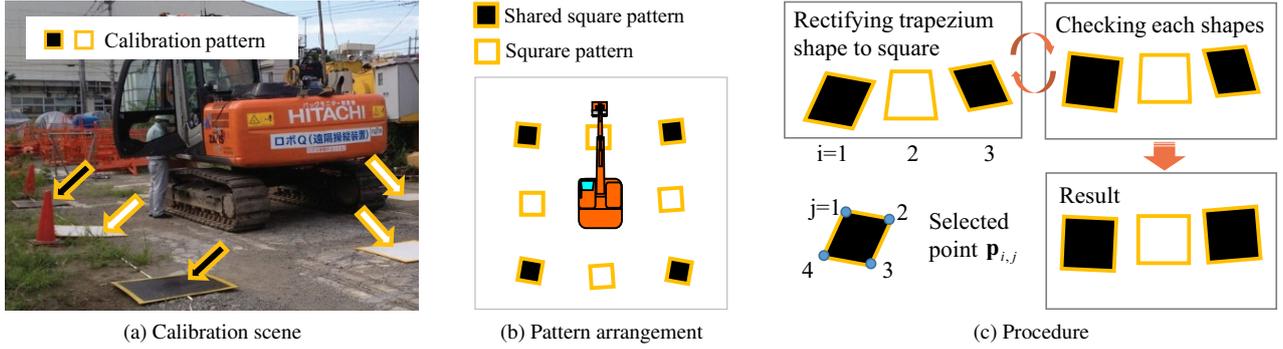


Fig. 3 Procedure of semi-automatic top view calibration. We put square boards on the ground. Two or more boards should be captured in each camera image. Each homography matrix to make top view is estimated from these boards.

次に出力座標をもとに正確に俯瞰映像となる座標，つまり4頂点が正方形に配置される場合の座標を求める。これを正方形座標 $\mathbf{p}''_{i,j} = [x''_{i,j}, y''_{i,j}]^T$ と定義する。正方形座標を求めるために，まず各パターンの $j=1$ から $j=2$ の単位ベクトル \mathbf{u}_i を導入する。それぞれは以下の式で表される。

$$\mathbf{u}_i = \frac{\mathbf{p}'_{i,2} - \mathbf{p}'_{i,1}}{\|\mathbf{p}'_{i,2} - \mathbf{p}'_{i,1}\|} \quad (2)$$

この単位ベクトルを用いて俯瞰映像となる正方形座標を式(3)~(6)のように表すことができる。 s は画像上の出力のスケールを考慮した係数である。 \mathbf{R} は2次元座標用の回転行列であり，括弧内の値は回転角を表している。

$$\mathbf{p}''_{i,1} = \mathbf{p}'_{i,1} \quad (3)$$

$$\mathbf{p}''_{i,2} = s\mathbf{u}_i + \mathbf{p}'_{i,1} \quad (4)$$

$$\mathbf{p}''_{i,3} = \sqrt{2}s\mathbf{R}\left(\frac{\pi}{4}\right)\mathbf{u}_i + \mathbf{p}'_{i,1} \quad (5)$$

$$\mathbf{p}''_{i,4} = s\mathbf{R}\left(\frac{\pi}{2}\right)\mathbf{u}_i + \mathbf{p}'_{i,1} \quad (6)$$

以上の出力座標 $\mathbf{p}'_{i,j}$ と正方形座標 $\mathbf{p}''_{i,j}$ を用いて，映像を真上からの視点へ変換するためのホモグラフィ行列 $\mathbf{H}_{\text{top}_k}$ を最適化手法により求める。目的関数には正方形座標と出力座標とのずれの総和を意味する $\varepsilon_{(\mathbf{H}_{\text{top}_k})}$ を設定する。この目的関数を最小化することで，正方形座標に対する出力座標のずれを小さくして，出力座標を正方形形状，つまり俯瞰視点からの形状に近づける。最適化には非線形の最適化手法である滑降シプレックス法 (Nelder and Mead, 1965) を用いる。また，制約条件として出力座標と正方形座標の各値が映像中の画素座標を意味することから，これらの各値はすべて正の実数であることを与える。

$$\text{minimize } \varepsilon_{(\mathbf{H}_{\text{top}_k})} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^4 \|\mathbf{p}''_{(\mathbf{H}_{\text{top}_k}) i,j} - \mathbf{p}'_{(\mathbf{H}_{\text{top}_k}) i,j}\|^2 \quad (7)$$

式(7)内の出力座標，正方形座標はホモグラフィ行列により決定される関数であるため括弧内に $\mathbf{H}_{\text{top}_k}$ を付している。目的関数も同様である。 N は映像中のパターンの数を意味している。この評価関数に対して予め閾値を設定しておき，その値を評価関数が下回る場合に最適化を完了するものとする。以上の処理をカメラの台数だけ繰り返し行うことで，全カメラに対するホモグラフィ行列 $\mathbf{H}_{\text{top}_k}$ が得られる。

2.3 俯瞰映像の統合

本研究では俯瞰映像の統合を自動的に行う手法を提案する。統合とは生成された各俯瞰映像を繋ぎあわせて全周囲の俯瞰映像を生成する処理であり，幾何学的にはワールド座標系の中の各仮想カメラの座標系を全て一致させることに相当する。図4はそのアルゴリズムの概要であり，前後左右のカメラの俯瞰映像中の正方形パターンが並進と回転を繰り返して繋がられていく様子を示している。この際に隣り合うカメラ同士の俯瞰映像上で共有しているパターンの出力座標が理想的には統合後の俯瞰映像と一致する性質を利用している。

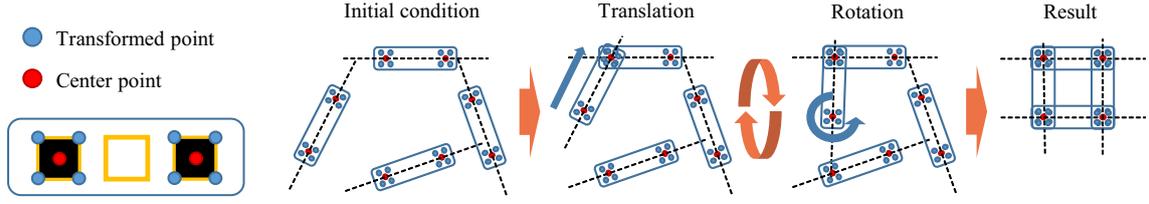


Fig. 4 Procedure of automatic bird's-eye view calibration. This calibration part starts automatically after finishing top view calibration. In order to combine each top view image, it is necessary that the images are coplanar and that the shared points are proportional.

座標変換は3次元空間上の並進ベクトルと回転行列により行われるが、回転行列は前節で既に2軸の成分を決定している。そのため、統合処理では残りの1軸の成分を求める。ここで同次変換行列 $\mathbf{H}_{\text{int}k}$ を定義し、統合処理ではこの行列の推定する。 k は前節同様にカメラを番号を示しており、前、左、後、右の順で $k = 1, 2, 3, 4$ とする。

統合処理ではまず出力座標の中心点を求める。中心点は図4左部に示すような、隣り合うカメラ同士で共有して撮影しているパターンの中のみを利用する。この中心点を $\mathbf{c}_{k,l} = (c_{x(k,l)}, c_{y(k,l)})$ と定義する。 l は映像中の中心点を区別する添字であり、映像上で左の点を $l = 1$ 、右の点を $l = 2$ とする。各カメラ k の左右の中心点は各カメラの出力座標 $\mathbf{p}'_{i,j}$ を用いて次の式で決定される。 N は前節と同様に映像中のパターンの数を意味している。

$$\mathbf{c}_{k,l} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \mathbf{p}'_{u,j} \quad (\text{ただし } l=1 \text{ のとき } u=1, l=2 \text{ のとき } u=N) \quad (8)$$

統合の処理はこの $\mathbf{c}_{k,l}$ をもとに行う。図4に示すように、はじめに前カメラの左中心点 $\mathbf{c}_{1,1}$ を基点として左カメラの右中心点 $\mathbf{c}_{2,2}$ が重なりあうよう左カメラの並進ベクトル \mathbf{t}_2 を求める。次に重ね合わせた中心点を原点として左カメラの座標を回転させ、ベクトル $\mathbf{c}_{2,1} - \mathbf{c}_{2,2}$ が後方カメラの右中心点 $\mathbf{c}_{3,2}$ へ向くような左カメラの回転行列 \mathbf{R}_2 を求める。その後も同様に後方カメラと右カメラの並進行列と回転行列を求める。これらの作業よりカメラの座標変換が行える。座標変換後の各中心点 $\mathbf{c}'_{k,l} = (c'_{x(k,l)}, c'_{y(k,l)})$ は行列 $\mathbf{C}'_{k,l} = [c'_{x(k,l)}, c'_{y(k,l)}, 1]^T$ と行列 $\mathbf{C}_{k,l} = [c_{x(k,l)}, c_{y(k,l)}, 1]^T$ を用いて以下の式から求めることができる。

$$\mathbf{C}'_{k,l} = [\mathbf{R}_k | \mathbf{t}_k] \mathbf{C}_{k,l} = \mathbf{H}_{\text{int}k} \mathbf{C}_{k,l} \quad (9)$$

ここで、対応する各中心点のずれの総和を表す関数 $\delta_{(\mathbf{H}_{\text{int}k})}$ を設定し、これを最小化することで中心点が繋ぎあわせるための、つまり全周囲の俯瞰映像が生成される際の同次変換行列 $\mathbf{H}_{\text{int}k}$ を推定する。

$$\delta_{(\mathbf{H}_{\text{int}k})} = \sum_{k=1}^4 |c'_{(\mathbf{H}_{\text{int}k}) k,2} - c'_{(\mathbf{H}_{\text{int}k}) k-1,1}| \quad (10)$$

ただし $c'_{0,1} = c'_{4,1}$ であり、座標変換後の各中心点は $\mathbf{H}_{\text{int}k}$ の関数である。この関数 $\delta_{(\mathbf{H}_{\text{int}k})}$ に対して予め閾値を設定し、閾値を下回るまで上記の座標変換を繰り返し続けるものとする。この統合処理で得られた同次変換行列 $\mathbf{H}_{\text{int}k}$ と各俯瞰映像生成で得られたホモグラフィ行列 $\mathbf{H}_{\text{top}k}$ を用いて、俯瞰映像を生成するための変換行列が決定される。最終的に俯瞰映像生成のための行列 $\mathbf{H}_{\text{bird}k}$ は以下のように表される。

$$\mathbf{H}_{\text{bird}k} = \mathbf{H}_{\text{int}k} \mathbf{H}_{\text{top}k} \quad (11)$$

2.4 俯瞰映像の可視化

キャリブレーション後は俯瞰映像の可視化処理を行う。この処理ではキャリブレーションで得られた行列 $\mathbf{H}_{\text{bird}k}$ から俯瞰映像を生成し、更に遠隔操作用の映像としてオペレータの臨場感を向上するための映像処理を行う。

処理手順を図5に示す。参考として図5(a)には各俯瞰映像生成完了後、図5(b)に俯瞰映像統合完了後の映像を示す。その後の可視化処理のためにはまず、得られた行列を用いて各カメラの画素座標と魚眼映像と俯瞰映像との画素の対応関係を全て取得する。その後この対応関係から、俯瞰映像中の画素が複数のカメラの画素で描画されている領域を分離するためのマスキング処理(図5(c))を行う。また、この対応関係をルックアップテーブルに出力させて映像処理を省くことでフレームレートの向上も行う。

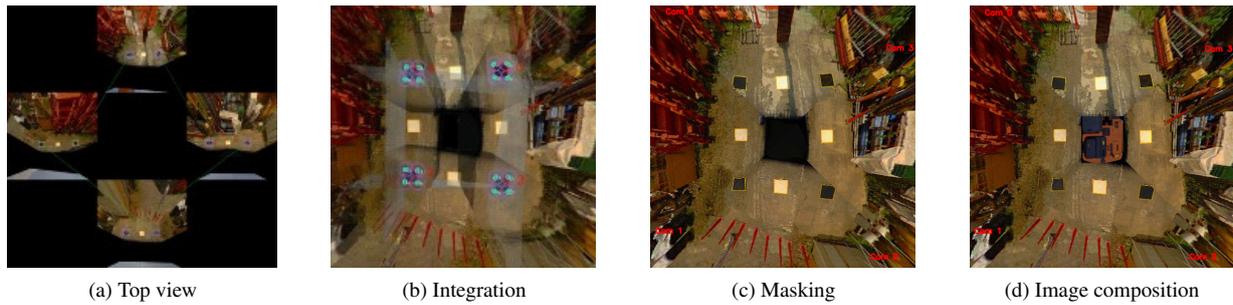


Fig. 5 Procedure of bird's-eye view visualization.

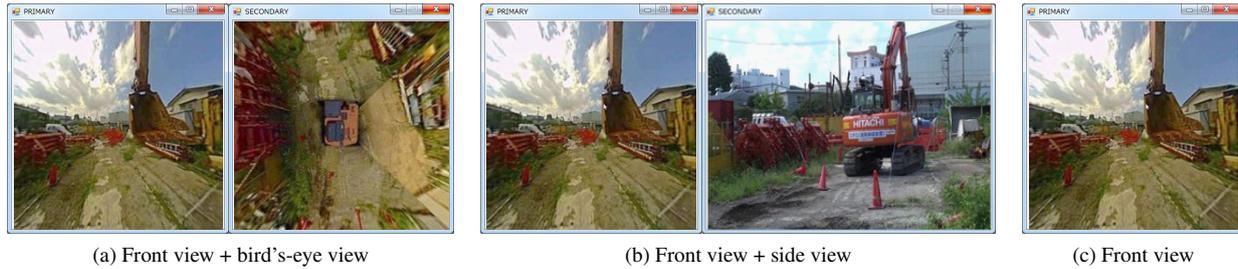


Fig. 6 Type of teleoperation view.

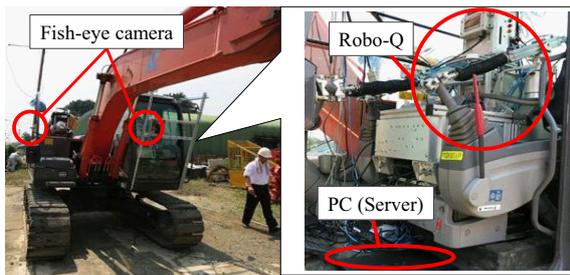


Fig. 7 Hardware system (backhoe).

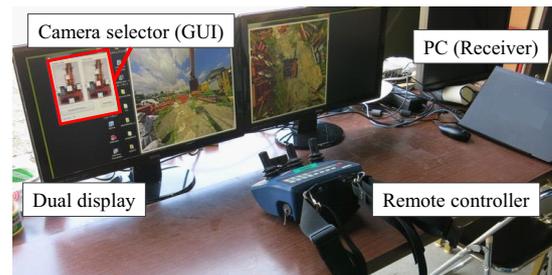


Fig. 8 Hardware system (teleoperation room).

最後に本研究では図 5(d) の中央部に示すよう、予め用意した建機の上からの写真を臨場感を与える目的で俯瞰映像へと重畳する。これにより、映像を環境だけでなく建機も上から眺めたようなものとする事で、遠隔操作時に実際に建機を第三者視点で操作している感覚を与える。

3. 評価実験

建機に関する遠隔操作システムでは文献(山田他, 2007)のように、これまでも操作性の評価実験が行われてきた。そこで、本研究でも俯瞰映像を用いた油圧ショベルの遠隔操作実験を行った。実験は無人数施工の熟練者を被験者とし、災害対応の作業を想定した。提示映像は図 2(b)と同様の映像(以降、前方映像)と俯瞰映像、カメラ車を想定して油圧ショベルの側面から撮影を行った映像(以降、カメラ車映像)を用いて、図 6 に示すような 3 種類の組み合わせで提示した。図 6(a) は前方映像と俯瞰映像を組み合わせた場合であり、図 6(b) は前方映像とカメラ車映像を組み合わせた場合、図 6(c) は前方映像単体の場合である。また、搭乗による作業との比較も行った。

実験は 2 度にわけて行った。1 度目には地面の掘削作業を行った。この実験では俯瞰映像と搭乗による作業との比較を行い、俯瞰映像提示システムで実掘削が可能であるか検証することを目的とした。2 度目の実験では災害対応におけるカメラ車映像と俯瞰映像との操作性の比較を目的として、遠隔操作による走行と模擬掘削の作業を行った。そして、これらの実験結果から俯瞰映像提示システムの操作性評価を行うことを最終的な目的とした。

3.1 システム構成

本実験で使用する油圧ショベル側のシステム構成を図7に示す。実験で使用した油圧ショベルの寸法は、全長約7.3m、全幅約2.5m、ブーム高さ約2.7mであり、運転重量が約11t、バケット容量が約0.45m³である。油圧ショベルのコクピットには建機の遠隔操縦ロボットシステムのロボQ (藤本他, 2003) が備えられており、これをリモコン送信機から無線通信を介して操作する。また、油圧ショベルの前後左右の側面に180°の画角を持つ魚眼カメラ (オプト株式会社製 NM33) が4台設置されている。これらの映像が油圧ショベル内のPCへ取り込まれた後に俯瞰映像生成処理が行われる。

遠隔操作室側のシステム構成を図8に示す。油圧ショベル側で生成された組み合わせ映像が通信により操作室のPCへと送信され、それぞれ操作卓上の21インチの2台のモニタの両画面へ提示される。この際に送信される映像はモニタに示されているGUI上で選択可能であり、俯瞰映像および前後左右の魚眼映像、歪み補正後の映像に切り替えることができる。また、カメラ車を想定したカメラが実験環境中に設置されているが、その映像も同じくモニタに提示されるようシステムを構築した。操作卓に設置されているリモコン送信機はロボQ専用の油圧ショベル遠隔操縦装置である。

なお、本システムは有線と無線を問わず通信可能であるが、無線による映像遅延が操作性評価に影響を与える可能性を考慮して有線で実験を行った。魚眼映像の解像度は640×480 pixel、最大フレームレートは15fpsであり、各提示映像の解像度は512×512 pixelとした。最終的にモニタへ提示される俯瞰映像のフレームレートは映像処理と通信の遅延により平均9fpsとなった。

3.2 実験方法

遠隔操縦の様子を図9に示す。図9(a)に示す油圧ショベルを図9(b)のように被験者が油圧ショベルの見えない位置から提示映像をもとに遠隔操作で作業を行う。なお、実験中、実験後には適宜インタビューを行う時間を設けた。これらについては、1回目、2回目どちらの実験も同様である。提示映像のモニタの大きさやフレームレートについては、予め被験者に習熟作業を行わせて確認を行った。インタビューからは、今回の実験の作業では十分に使用に耐え得ることがわかった。

まず、1度目の実験の詳細について述べる。この実験では地面の掘削作業 (図10(a)) と排土作業 (図10(b)) を繰り返して行う作業を行い、俯瞰映像と前方映像を用いた場合 (図6(a)) と搭乗による作業との比較を行った。被験者は無人化施工歴3年の経験者であり、実験前に俯瞰映像を用いた遠隔操作の習熟を2日間行った。

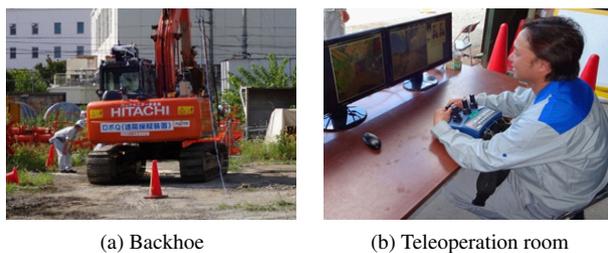


Fig. 9 Example scene of experiment.

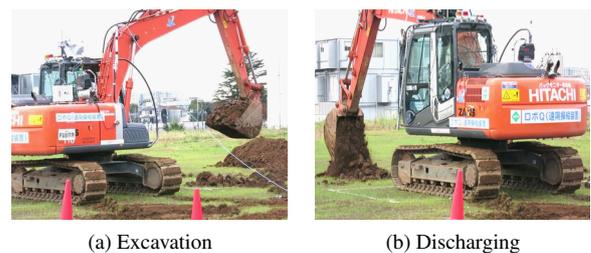


Fig. 10 Excavation scene.

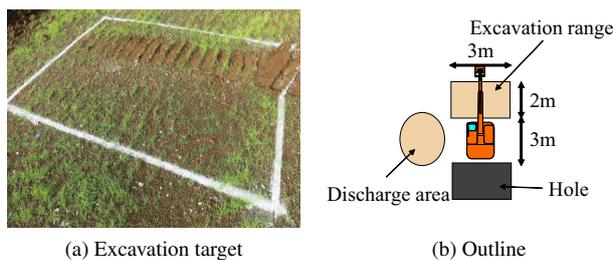


Fig. 11 Excavation experiment.

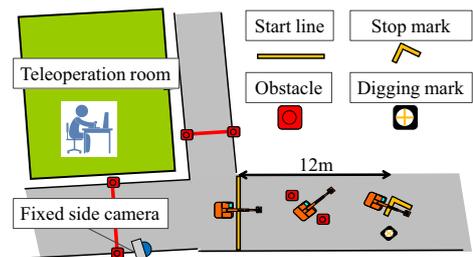


Fig. 12 Experimental outline.

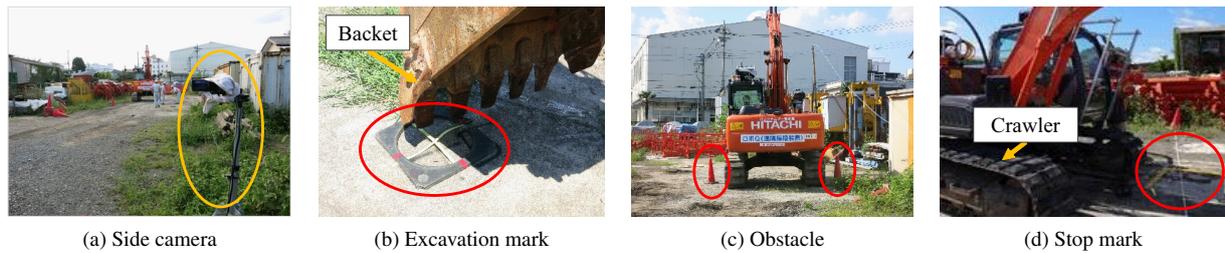


Fig. 13 Experimental feature.

図 11(a) に掘削前の掘削領域を示す。このように掘削領域は白線で囲まれている。掘削領域を含めた作業領域の模式図を図 11(b) に示す。この図に示すよう建機の片側は掘削領域であり、反対側の黒塗りの部分は掘を想定した進入禁止領域である。この間の作業領域の余裕幅は 3m である。この作業領域の中で幅 2.5m の建機を微調節で移動させながら位置決めを行い、奥行き 2m, 横幅 3m の領域内の土をバケットで掘削する。バケットとは油圧ショベルのアーム先端のアタッチメントである。そして、掘削後に建機の上部を旋回してバケットの土を排土する。実験は作業者が掘削領域の地面を全て掘削できたと判断するまでに行い、その際の作業時間と出来形について比較する。ここでの出来形とは、掘削作業が行われた後の掘削領域の形状を意味している。実験パターンは前方映像と俯瞰映像を組み合わせた遠隔操作による作業と、搭乗による作業の 2 種類とする。それぞれのパターンで実験を 1 回ずつ行った。

次に、2 度目の実験の詳細を述べる。被験者は無人化施工歴 12 年の熟練者であり、実験前に油圧ショベルの遠隔操作、実験練習、俯瞰映像の説明などの準備時間を 1 時間設けた。図 12 に実験環境と作業内容の概要を示す。この図に示すように、被験者は建屋内の操作室から遠隔操作を行う。また、カメラ車映像用のカメラは近距離かつ油圧ショベルの作業を妨げないよう建機を後ろから眺めることが可能な位置へ固定している。そのカメラの実際の様子は図 13(a) に示す通りである。2 度目の実験の詳細は模擬掘削実験と走行実験の 2 つに分類され、それぞれ別けて行った。また、走行実験は更に障害物環境下走行とライン走行停止の 2 種類を行った。以下、図 12 と図 13 を照らし合わせながら実験の詳細を述べる。

はじめに、模擬掘削実験であるバケット設置について述べる。バケットにより瓦礫など特定の対象を撤去する際は掘削位置の正確さが求められる。そこで、バケット設置実験では図 12 の停止位置の油圧ショベルが停止位置から本体上部を旋回し、掘削位置の目印へバケットを正確に降ろす作業を行わせた。バケットが設置された際の様子を図 13(b) に示す。この図のように地面に設置された正方形の設置マークの中心にバケットの爪の左を合わせる。この際、バケットを何度も設置可能としてしまうと、公正な評価を行うことができない。そのため、遠隔操縦は建機の旋回のみ微調整を許容し、その後のアーム操作は微調整不可として一度で決めるものとした。評価指標は対象を捉えるために重要な横ずれ量（旋回円接線方向のずれ量）を計測した。

次に、走行実験である障害物環境下走行について述べる。この実験では油圧ショベルが図 12 の走行開始位置から距離 12 m の区間を走行する。災害対応の環境下では瓦礫の散乱のために走行が困難となるような障害物が考えられるが、この環境においても建機を安全に作業現場まで移動できることが重要である。そこで、図 13(c) に示すように、この 12 m の区間に機体の余裕幅 0.5 m の間隔で 2 つのコーンを設置し、その間を油圧ショベルが方向転換を伴いながら通り抜けるよう走行作業を行わせた。この際には安全に通り抜けることを指示し、コーンへの衝突回数を評価指標として計測した。

最後に、走行実験であるライン走行停止を述べる。建設作業では地形の不安定さや掘削対象までの距離を考慮して建機の位置決めを精度良く行うことが重要である。そこで、この実験では油圧ショベルが障害物環境下を走行した後に図 12 の停止ラインの位置で正確に停止を行う。その様子を図 13(d) に示す。このように L 字型の停止ラインを地面に設置し、停止ラインにクローラーを正確に合わせるように停止を行った。その際、左クローラーの左角とライン原点とのずれ距離を評価指標とした。ライン走行停止の実験もバケット設置と同様に公正な評価を行うため、微調整のための後進を一度までと指示した。

以上の実験を計測データの信頼性を高めるため繰り返して行った。障害物環境下での走行を 8 回、ライン走行停止を 8 回、バケット設置を 10 回行い、各実験の各回で作業時間が同程度となるように被験者に指示を加えた。

また、慣れを考慮してコーンと設置マークの位置は複数のパターンを用意した。これにより、計測データが作業時間や慣れの要因によってばらつかないようにした。提示する映像の種類は前方映像と俯瞰映像（図 6(a)），前方映像とカメラ車映像（図 6(b)），前方映像単体（図 6(c)）の 3 種類で比較を行った。

4. 実験結果

以下、掘削作業を想定した掘削実験、バケット設置、走行作業を想定した障害物環境下走行、ライン走行停止の各実験の結果と考察を行い、最後に実験のまとめを示す。

4.1 掘削実験

表 1 に掘削実験の結果を示す。1 行目は項目であり、左から作業方法、作業時間、出来形の奥行き、横幅を表している。2 行目は出来形的设计値である。3 行目は前方映像と俯瞰映像で作業した際の結果である。作業時間は 930 s であり、出来形は奥行きが 2.7 m と設計値に比べ 0.7 m 大きく、横幅は設計値と同じ 3.0 m であった。出来形の写真を図 14(a) に示す。計測は図のように設計した掘削領域の中心点の位置から奥行き方向、横方向の両端までの距離を 0.1 m 単位で測定した。4 行目は搭乗の際の実験結果である。作業時間は 240 s であり設計値通り奥行き 2.7 m、幅 3.0 m の出来形が得られた。搭乗作業での出来形の写真を図 14(b) に示す。計測方法は先程と同様である。

作業時間について考察を行う。映像作業は搭乗作業と比べて約 3.8 倍の時間で可能であることが確認できた。文献(新田他, 2012)では既存の無人化施工システムを用いて災害対応におけるオペレータの技能検証を行っている。擬似の掘削としてブロックを掘りあげて別位置へ設置する場合の検証では、熟練者の搭乗作業と遠隔操縦との時間差は最大 6.0 倍となっている。よって、本研究の提案システムも災害時の緊急対応としては十分実用に耐え得る時間の範囲内である。この掘削作業の中ではバケットの位置決めにも最も時間を要していた。位置決め精度はバケット設置実験で確認しているが、実掘削の際にバケットを上げた状態では俯瞰映像の原理上、高い位置のバケットを表示できず、これが原因で作業時間が増大したと考えられる。具体的には掘削時に、まず前方映像から大まかな位置が決定された後、俯瞰映像を加えた微調整により掘削の位置決めが行われていた。今後は、バケットやアームなど高さのある物体との位置関係を正確に把握するための機能も重要であると考えられる。現状では俯瞰視点は機体の真上に固定されているため、前方映像を俯瞰映像と組み合わせ用いているが、例えば CG でバケットやアームを提示する機能や、俯瞰映像における仮想的なカメラの視点を変更できる機能も必要と考えられる。

次に出来形の考察を行う。出来形は奥行き方向の手前側に 0.7 m の誤差があった。有人の建設施工の現場では一般的に粗掘削の精度は 0.5 m 以内とされており、今回の実験では、その精度にはおさまらない結果となったが、災害時の緊急対応としては十分要求に耐え得る精度であると考えられる。

また、手前側の誤差が大きくなっている理由としては、バケットを引き抜く際にバケット周囲の地面も崩れることや、地中のバケットの状況を映像上から判断しにくい点が挙げられる。遠隔操作における掘削作業では精度向上のために、聴覚や触覚といった視覚情報以外の提示も必要であると考えられる。

以上、俯瞰映像による実掘削は搭乗に比べては劣るものの、災害時の緊急対応として十分妥当な時間および精度で行うことができた。災害対応における遠隔操作用映像提示として本提案システムは十分に実用的と考えられる。

Table 1 Result of work progress.

Operation type	Time [s]	Depth [m]	Width [m]
Target	-	2.0	3.0
Front + Bird's-eye	930	2.7	3.0
Boarding	240	2.0	3.0

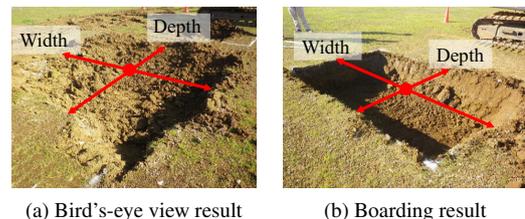


Fig. 14 Work progress image.

4.2 バケット設置

バケット設置の実験結果を図 15 に示す。横軸は提示映像のパターンであり、縦軸はバケット設置マークとバケット設置位置との横ずれ量の絶対値の全 10 回の平均である。エラーバーは標準偏差を示している。バケット設置位

置の横ずれ量を各映像で比較した結果、横ずれ量は前方映像と俯瞰映像の組み合わせが最も少なくなった。

バケット設置時の各映像を図 16 に示す。前方映像は最も搭乗に近い感覚でバケットを設置できるが、環境の立体的な把握が必要となり、立体感のない単調な環境では遠近感をつかめない場合がある。カメラ車映像は横からの視点となるためバケットの高さを把握可能であるが、カメラの奥行き方向（本実験では横ずれ方向）は把握が困難である。これに対して俯瞰映像は上からの視点であり、地面を平面図のように捉えることができるため左右前後の位置合わせが行いやすい。俯瞰映像では高さ方向は把握しにくい、前方映像を組み合わせることで精度向上が可能である。つまり、バケットの位置決め時には複数の映像を相補的に用いて設置を行うことが重要となる。

カメラ車映像ではカメラ車位置に設置精度が影響すると考えられるが、今回の実験では最も現実的な位置に配置している。奥行き方向のずれをなくすためには掘削対象の向かいにカメラを配置するのが最も良いが、瓦礫の散乱している掘削対象側にカメラ車を配置することは困難である。また、横に狭い環境では横に回り込めず後ろからの視点に限られるが、その場合は油圧ショベルが視界を大きく遮るためカメラ車映像による作業は困難と予想される。

以上より俯瞰映像は掘削の位置決め時に地面の把握が容易な点や、環境の複雑さによらず表示できる点で有利であり、前方映像と相補的に用いることができる点でカメラ車と同様に有効であると考えられる。

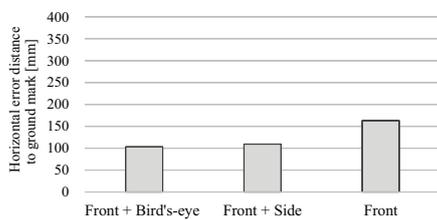


Fig. 15 Result of controlling basket.

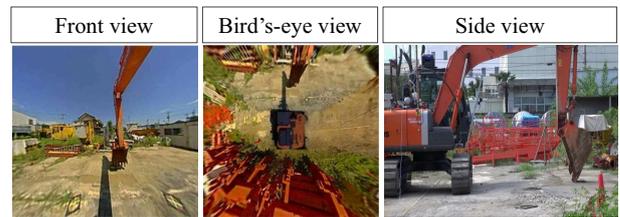


Fig. 16 Example images in controlling basket experiment. Bird's-eye view image is helpful to estimate ground position.

4.3 障害物環境下走行

障害物環境下走行実験の結果を図 17 に示す。横軸は提示映像のパターンであり、縦軸は全 8 回の走行中にコーンへ衝突した合計回数である。衝突回数を各映像で比較した結果、前方映像と俯瞰映像の組み合わせが 2 回で最も少なかった。また、前方映像とカメラ車映像は 5 回、前方映像単体は 7 回であった。

障害物環境下走行時の各映像を図 18 に示す。コーンの間を通り抜ける際に前方映像では画角が十分でないことから両側のコーンが死角となっており、被験者へのインタビューから操作が勘により行われていることがわかった。また、カメラ車映像では油圧ショベルが奥側コーンの視界を遮るために、奥側コーンの領域が死角となっており、カメラ車映像から奥側コーンの位置を推定して走行が行われていたことが明らかになった。これらに対して俯瞰映像は常に両側のコーンが表示されていた。このことから前方映像と俯瞰映像の組み合わせではコーンを通り抜ける際は俯瞰映像のみによる操作が行われていた。

衝突したコーンの設置位置から考察を行う。両側のコーンが死角となる前方映像では、衝突した 7 個のコーンの内訳は手前が 3 個で奥側が 4 個であり、死角となる両方のコーンに接触していた。さらに、奥側のコーンが死角となるカメラ車映像は 5 個全てが奥側のコーンで衝突していた。このことから死角が発生する映像では操作者

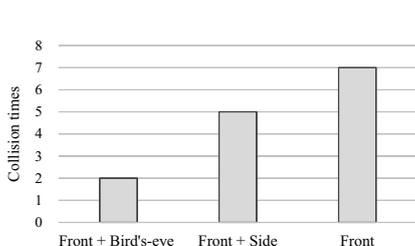


Fig. 17 Result of moving narrow path.



Fig. 18 Example images in moving narrow path experiment. Red circles indicate obstacles. Bird's-eye view can show both of obstacles.

の勘や推定に頼る走行が生じ、特に衝突の危険性が高まると考えられる。よって、建機の安全走行においては映像の死角を減らすことが重要であり、そのために俯瞰映像が有効であると考えられる。

4.4 ライン走行停止

ライン走行停止実験の結果を図 19 に示す。横軸は提示映像のパターンであり、縦軸はクローラーの停止位置と停止ラインとのずれ量の絶対値の全 8 回の平均である。エラーバーは標準偏差を示している。停止位置のずれ量を各映像で比較した結果、前方映像と俯瞰映像の組み合わせが最も少なくなった。

ライン走行停止時の各映像を図 20 に示す。前方映像は画角の大きさが不十分で停止ラインが見えないため操作は勘で行われていたことがインタビューから明らかになった。また、カメラ車映像ではクローラーの隙間からラインの一部が映されていたが、他の大部分は死角となっており、前方映像とカメラ車映像をあわせて比較しながら操作が行われていたことが明らかになった。これに対して俯瞰映像は常に無死角で油圧ショベルと停止ラインの位置を相対的に表示できており、前方映像を必要とせず操作が行われていた。カメラ車映像の死角の問題はカメラ位置によっては解消可能な場合もあるが、今回の実験環境のような狭い環境下ではカメラ車が回りこむことが出来ないため実際の現場においては現実的でない。以上より俯瞰映像は位置決め時に環境と油圧ショベルを相対的に表示できる点でカメラ車に比べて有利と考えられる。

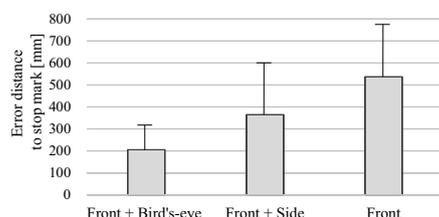


Fig. 19 Result of controlling stop position.



Fig. 20 Example images in controlling stop position experiment. Yellow circles indicate stop marks. Bird's-eye view can show a backhoe and a stop mark relatively.

4.5 評価実験のまとめ

災害対応を想定した作業について俯瞰映像提示システムの評価を行った。実掘削作業では搭乗との比較を行った。その結果、災害時の緊急対応としては十分妥当な時間および精度で掘削を行うことができた。また、従来の映像提示手法であるカメラ車映像との比較では、俯瞰映像が障害物の安全回避や建機の位置決め精度、掘削の位置決め精度で有効であることが示された。以上から災害対応における俯瞰映像システムの有効性を検証することができた。

5. お わ り に

本研究では緊急災害対応用の俯瞰映像提示システムの開発を行った。複数の魚眼カメラを建機へ取り付け、地面周囲に正形状のパターンを設置することで、災害対応の現場でも簡便に俯瞰映像を生成することのできるキャリブレーション手法を提案した。

評価実験では、災害対応を想定した作業における俯瞰映像提示システムの操作性評価を行った。その結果、掘削作業では搭乗には及ばないものの遠隔操縦としては十分妥当な時間および精度で掘削が可能であることがわかった。また、バケットの位置決め時には従来のカメラ車映像提示手法と同等以上の精度を得ることができた。走行作業についてはカメラ車映像と比べて、安全走行や建機本体の位置決め精度の点で俯瞰映像の有効性が確認された。以上から緊急災害対応における提案システムの有効性を検証することができた。

今後、無人化施工において遠隔操作システムの操作性を向上させる上では、提示映像の高解像度化や高フレームレート化は有効であると考えられる。俯瞰映像提示システムの高パフォーマンス化による、更なる操作性の改善は今後の課題である。

謝 辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」、および科研費若手研究(A)22680017の一部として実施されたものである。

文 献

- 浅利圭介, 石井洋平, 本郷仁志, 蚊野浩, 鳥瞰画像生成における校正環境の簡易化, 第13回画像センシングシンポジウム予稿集(2007), 1N1-13.
- 馬場勝之, 久米康歳, T-53 援竜(中越沖地震災害復旧活動報告), 日本建設機械化協会, 建設の施工企画(703)(2008), pp. 50-54.
- 藤本昭, 松岡雅博, 茶山和博, 藤岡晃, 遠隔操縦ロボット(ロボQ)の開発, 土木学会第58回年次学術講演会概要集, Vol. 58, No. 6(2003), pp. 61-62.
- 林宏樹, 田村隆幸, 三鬼尚富, 無人化施工における通信遅延と通信周期が施工効率に与える影響の分析と改善提案, 平成21年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集, No. 23(2009), pp. 119-124.
- Hughes, C., Denny, P., Glavin, M. and Jones, E., Equidistant fish-eye calibration and rectification by vanishing point extraction, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 32, No. 12(2010), pp. 2289-2296.
- 古屋弘, 栗山楊雄, 清水千春, 3D画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施工システム」, 大林組技術研究所報, No. 76(2012), pp. 1-10.
- 金岡晃廣, 高野照久, 菅原大輔, 大谷荘太郎, 鈴木政康, 知野見聡, 大泉謙, アラウンドビューモニタの開発(特集: Safety Shield コンセプトに基づく安全新技術), 日産技報, No. 63(2008), pp. 37-41.
- Liu, Y. C., Lin, K. Y. and Chen, Y. S., Bird's-eye view vision system for vehicle surrounding monitoring, Robot Vision - RobVis(2008), pp. 207-218.
- Nelder, J. A. and Mead, A., A simplex method for function minimization, Computer Journal, Vol. 7(1965), pp. 308-313.
- 新田恭士, 松尾修, 北原成郎, 黒田昇, 田村圭司, 下田孝徳, 超長距離無人化施工技術の適用性に関する考察—雲仙賢岳における超長距離遠隔操作実証実験の概要—, 建設ロボットシンポジウム論文集, Vol.13(2012), pp. 41-50.
- 岡本寛也, Khat, A., 下村倫子, 梅田和昇, 既知パターンを用いた複数魚眼カメラの外部パラメータ推定, 第19回画像センシングシンポジウム予稿集(2013), IS2-14.
- Sato, T., Moro, A., Sugahara, A., Tasaki, T., Yamashita, A. and Asama, H., Spatio-temporal bird's-eye view images using multiple fish-eye cameras, Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration(2013), pp. 753-758.
- 佐藤貴亮, Moro, A., 山下淳, 浅間一, 複数の魚眼カメラとLRFを用いた重畳型全方位俯瞰画像提示手法の構築, 第13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(2012), pp. 2433-2436.
- Shimizu, S., Kawai, J. and Yamada, H., Wraparound view system for motor vehicles, Fujitsu Scientific & Technical Journal, Vol. 46, No. 1(2010), pp. 95-102.
- 山田宏尚, 加藤英寿, 土井達也, 力覚提示機能を有する遠隔操作建設ロボットシステムの操作性評価: カメラ映像による遠隔操作ロボットシステムに力覚提示機能を備えた場合の操作性評価, 日本機械学会論文集C編, Vol. 73, No. 735(2007), pp. 3055-3062.
- 山口崇, 吉田正, 石松豊, 遠隔操作におけるマンマシンインターフェースに関する実態調査, 土木学会第59回年次学術講演会概要集, Vol. 59(2004), pp. 373-374.

References

- Asari, K., Ishii, Y., Hongo, H. and Kano, H., A practicable calibration method for top view image generation, Proceedings of the 13th Symposium on Sensing via Image Information(2007), 1N1-13 (in Japanese).
- Baba, K. and Kume, Y., T-53 Enryu (Chuetsu-oki jishin saigai fukkyu katsudou houkoku), Japan Construction Machinery and Construction Association, Kensetsu no sekoukikaku(703)(2008), pp. 50-54 (in Japanese).
- Fujimoto, A., Matsuoka, M., Tyayama, K. and Fujioka, A., Enkaku souju robotto (Robo-Q) no kaihatu, Proceedings of the 58th Annual Meeting on Japan Society of Civil Engineers, Vol. 58, No. 6(2003), pp. 61-62 (in Japanese).

- Hayashi, H., Tamura, T. and Miki, H., Mujinkasekou ni okeru tsuusin chien to tuusin syuki ga sekou kouritu ni ataeru eikyou no bunseki to kaizen teian, Proceedings of the Heisei 21th Symposium on Japan Construction Machinery and Construction Association, No. 23 (2009), pp. 119–124 (in Japanese).
- Hughes, C., Denny, P., Glavin, M. and Jones, E., Equidistant fish-eye calibration and rectification by vanishing point extraction, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 32, No. 12 (2010), pp. 2289–2296.
- Huruya, H., Kuriu, N. and Shimizu, C., Development of next-generation remote-controlled machinery system, Report of Obayashi Corporation Technical Research Institute, No. 76 (2012), pp. 1–10 (in Japanese).
- Kanaoka, A., Takano, T., Sugawara, D., Otani, S., Suzuki, M., Chinomi, S. and Oizumi, K., Development of the Around View Monitor (special feature: the development of safety technology), Nissan technical review, No. 63 (2008), pp. 37–41 (in Japanese).
- Liu, Y. C., Lin, K. Y. and Chen, Y. S., Bird's-Eye view vision system for vehicle surrounding monitoring, Robot Vision - RobVis (2008), pp. 207–218.
- Nelder, J. A. and Mead, A., A simplex method for function minimization, Computer Journal, Vol. 7 (1965), pp. 308–313.
- Nitta, Y., Matsuo, O., Kitahara, S., Kuroda, N., Tamura, K. and Shimoda, T., A study of the application of ultra-long-range remote-controlled construction technology - A summary of ultra-long-range remote control experiment in Mt. Fugen in Unzen - , Proceedings of the 13th Symposium on Construction Robotics, Vol.13 (2012), pp. 41–50 (in Japanese)
- Okamoto, H., Khiat, A., Shimomura, N. and Umeda, K., Kichipatân wo mochiita fukusuu gyogan kamera no gaibu paramêta suitei, Proceedings of the 19th Symposium on Sensing via Image Information (2013), IS2–14 (in Japanese).
- Sato, T., Moro, A., Sugahara, A., Tasaki, T., Yamashita, A. and Asama, H., Spatio-temporal bird's-eye view images using multiple fish-eye cameras, Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (2013), pp. 753–758.
- Sato, T., Moro, A., Yamashita, A. and Asama, H., A construction of a multi layered bird's-eye view image with multiple fish-eye cameras and a LRF, Proceedings of the 13th SICE System Integration Division Annual Conference (2012), pp. 2433–2436 (in Japanese).
- Shimizu, S., Kawai, J. and Yamada, H., Wraparound View System for Motor Vehicles, Fujitsu Scientific & Technical Journal, Vol. 46, No. 1 (2010), pp. 95–102.
- Yamada, H., Kato, H. and Doi, T., Operational evaluation of a construction tele-operation robot with force feedback: evaluation of the operation system with video image display (mechanical systems), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 73, No. 735 (2007), pp. 3055–3062 (in Japanese).
- Yamaguchi, T., Yoshida, T. and Ishimatsu, Y., Enkaku sousa ni okeru man mashin intâfuêsu ni kansuru jittai chousa, Proceedings of the 59th Annual Meeting on Japan Society of Civil Engineers, Vol. 59 (2004), pp. 373–374 (in Japanese).