

無人化施工における擬似俯瞰映像提示システムの開発

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

Development of Virtual Bird's-eye View System in Unmanned Construction

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

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

^{*2}Ritecs

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

^{*3}Fujita Corporation

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

This paper describes a development of virtual bird's-eye view system for teleoperation. Unmanned construction is used to recover from natural disaster 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 a method to create virtual bird's-eye view images which can reduce blind spots from multiple wide view cameras. Our method helps workers understand environment easily and operate construction machines safely. In addition, we evaluate working efficiency by integrating a bird's-eye view system into actual unmanned construction systems.

Key Words : Unmanned Construction, Teleoperation, Bird's-eye View

1. 序 論

本研究では、無人化施工における遠隔操作のための擬似俯瞰映像生成手法を提案する。また、擬似俯瞰映像が操作性に与える影響について実機実験で評価を行う。図1に擬似俯瞰映像のコンセプトを示す。

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。自然災害への迅速な対応は重要な事柄であるが、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。

しかし、無人化施工は遠隔操作での作業となる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⁽¹⁾の調査によれば、その要因として視覚の問題

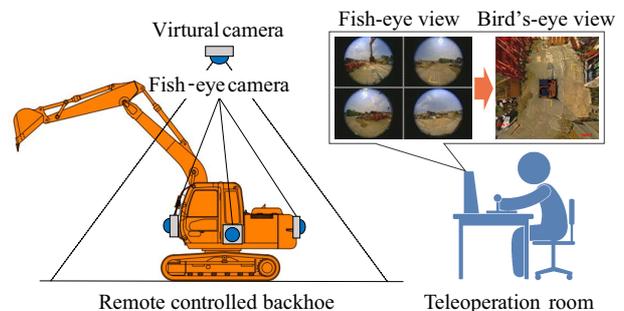


Fig. 1 Concept of virtual bird's-eye view.

が29%と最も高く、その中でもカメラ位置の問題が44%であり最も高いとされている。よって、無人化施工での作業効率を高めるためには視覚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。文献⁽²⁾では作業車となる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て提示している。

^{*1} 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) {satoh,fujii,sugimoto,yamshita,asama}@robot.t.u-tokyo.ac.jp

^{*2} 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

^{*3} 株式会社フジタ (〒 151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷 4-25-2) {akira.nozue,ymimura,obata}@fujita.co.jp

このカメラ車映像は視点が第三者視点であるため、カメラ車映像には環境だけでなく建機自体が相対的に映りこむ。そのため建機と掘削対象物との遠近感を把握しやすい。建機のカメラ映像中で死角となっている領域もカメラ車を適宜移動することで補うことができる。

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、その分の手間やコストが必要となる。更に、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練が求められる。

緊急災害対応の点では更に大きな問題がある。土石や瓦礫の散乱した狭く複雑な環境下ではカメラ車の適切な配置が困難となる点である。効率良く緊急災害対応を行うためにはカメラ車配置の問題解決が必要不可欠である。

以上の問題を解決するために、本研究では擬似俯瞰映像提示手法を提案する。擬似俯瞰映像（以降、俯瞰映像）は、擬似的に建機を上空から眺めた映像であり、建機の周囲に複数のカメラを取り付け、それらの映像を変換して合成することで生成される。この俯瞰映像はカメラ車映像と同様に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表示できる。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。

俯瞰映像は幾何学に基づく視点変換技術であり、これまでも応用技術として車の駐車操作支援のための研究開発が行われている^{(3)~(5)}。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⁽⁶⁾。本研究では無人化施工のための俯瞰映像を生成する。具体的には、作業現場で簡単に俯瞰映像を生成できるキャリブレーション方法について述べる。

そして、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による実機検証を行う。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

本研究の俯瞰映像は建機の前左右に取り付けた魚眼カメラの映像から生成される。その手順として、はじめに魚眼映像の魚眼レンズによる撮像特有の歪み歪み補正を行い、補正後の映像を上から眺めたような俯瞰映像へと変換し、それらの映像を繋ぎあわせて全周囲の俯瞰映像へと統合する。2.2節については文献⁽⁷⁾⁽⁸⁾のキャリブレーション手法を参考にして実装を行った。

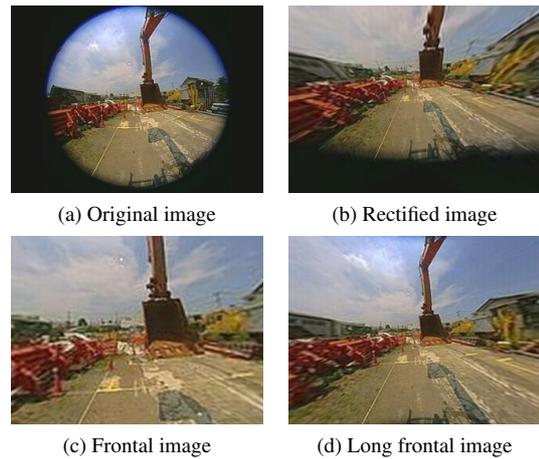


Fig. 2 Rectification of fish-eye image.

2.1 魚眼映像の歪み補正 油圧ショベル前方の魚眼カメラの映像を図2(a)に示す。魚眼映像は魚眼レンズによる撮像特有の歪みを持つ反面、画角が約 180° と広く、一度に広い領域を撮影できるカメラである。

まず最初に、俯瞰映像生成では魚眼映像の一部領域の歪み補正を行う。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ことが重要な役割となる。このため、歪み補正領域は撮影領域の最下部を含めた領域とする。なお、魚眼映像の歪み補正には文献⁽⁹⁾の手法を利用した。

また、同様の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を擬似的に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)に示すようにアーム部を表示できる映像も生成可能である。このように提案システムでは魚眼カメラから俯瞰映像以外の作業映像も同時に生成して提示を行う。

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（図3(a)）。その際に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。本手法においては、歪み補正後の映像中の地面を平面と仮定し、その面を建機の真上に仮想的に作り出したカメラの座標の面へと射影することに相当する。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。

各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。図3(b)に示すようにキャリブレーションは建機周囲の地面に複数の正方形パターンを設置することで簡便に行うことができる。なお、パターン設

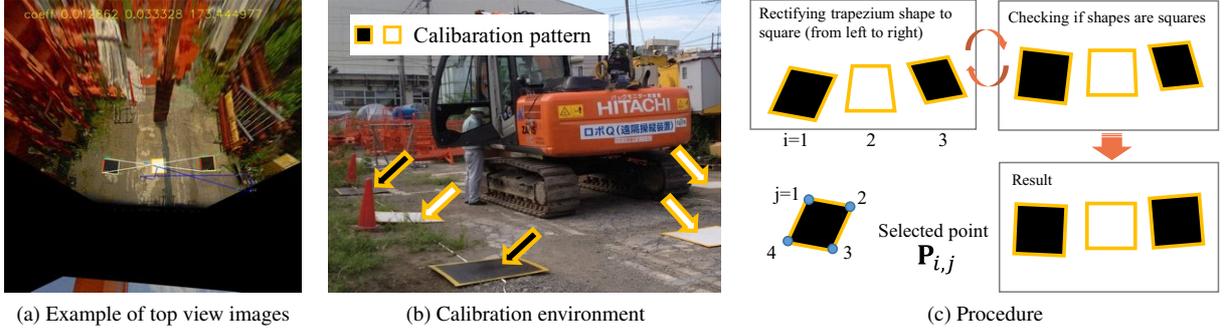


Fig. 3 Procedure of semi-automatic top view calibration. We put square boards on the ground. Two or more boards should be captured in each camera image. Each homography matrix to make top view is estimated from these boards.

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、隣り合うカメラがパターンを1つ以上共有して撮影できる位置にする必要がある。例えば図3(b)の下部にある黒色のパターンは建機の後方と左方の2つのカメラが共有して撮影している。全てのカメラ映像上でこれらのパターンの各頂点を、PCでのマウスクリック入力により手動で与える。なお、正方形パターンはカメラ台数以上必要であるが、歪み補正の誤差や頂点位置入力時の誤差を考慮して、枚数を多くすることが望ましい。

俯瞰映像化の手順を図3(c)に示す。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表し、 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。

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

次に出力座標をもとに正確に俯瞰映像となる座標 $\mathbf{p}''_{i,j}$ (以降、正方形座標)、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。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。

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

このベクトルを用いて俯瞰映像となる正方形座標は式(3)~(6)の式のように表される。

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

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

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

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

ここで、 a は画像上の出力のスケールを考慮した係数であり、 \mathbf{R} は2次元座標用の回転行列である。括弧内の値は回転角を表している。

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 $\mathbf{H}_{\text{top}_k}$ を非線形の最適化手法である滑降シンプレックス法⁽¹⁰⁾で求める。また、制約条件として正方形座標と出力座標の各値が正の値であることを与える。正方形座標と出力座標とのずれの総和を意味する以下の目的関数 $\varepsilon(\mathbf{H}_{\text{top}_k})$ を設定する。この目的関数を最小化することで、出力座標を正方形に近いものにする。出力座標と正方形座標はどちらも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 $\varepsilon(\mathbf{H}_{\text{top}_k})$ を付している。 N は映像中のパターンの数を意味している。

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

さらに各俯瞰映像生成ではスケールの統一や形状の角度に関する評価も行う必要がある。式(8)、(9)の評価は、予め設定しておいた式(7)に対する閾値を評価関数 $\varepsilon(\mathbf{H}_{\text{top}_k})$ が下回る場合のみ行うものとする。

$$\varepsilon'_{(\mathbf{H}_{\text{top}_k})} = |b - \min(\sqrt{\mathbf{p}'_{(\mathbf{H}_{\text{top}_k)} i,j} \cdot \mathbf{p}'_{(\mathbf{H}_{\text{top}_k)} i,f}})|, \quad (8)$$

$$\varepsilon''_{(\mathbf{H}_{\text{top}_k})} = \max(\sqrt{\mathbf{p}'_{(\mathbf{H}_{\text{top}_k)} i,j} \cdot \mathbf{p}'_{(\mathbf{H}_{\text{top}_k)} i,f}}) - \min(\sqrt{\mathbf{p}'_{(\mathbf{H}_{\text{top}_k)} i,j} \cdot \mathbf{p}'_{(\mathbf{H}_{\text{top}_k)} i,f}}), \quad (9)$$

f は $j \neq f$ となる整数である。関数内の \min , \max は (i, j, f) の全ての組み合わせで括弧内の式を計算した時の最小値、最大値を表している。 b はスケールを固定するための変数である。これらの評価関数に対しても予め閾値を設定し、それらを同時に下回る場合にキャリブレーションが完了するものとする。この処理を全てのカメラ映像で行い、ホモグラフィ行列 $\mathbf{H}_{\text{top}_k}$ を得る。

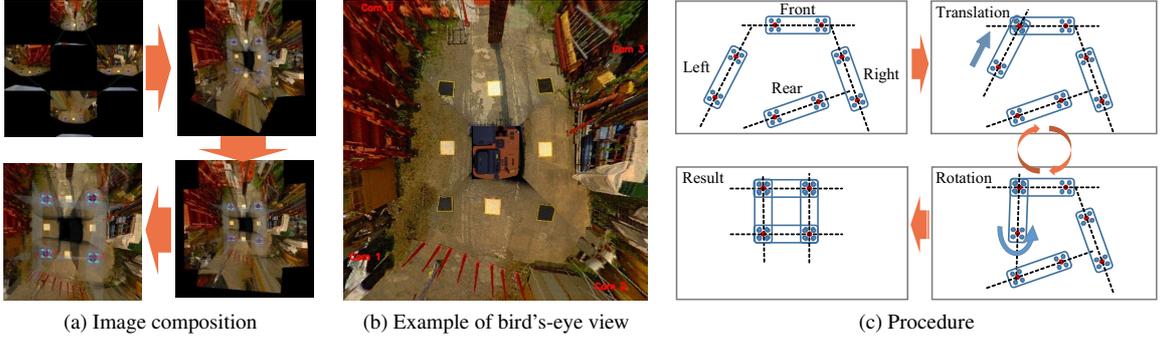


Fig. 4 Procedure of automatic bird's-eye view calibration. This calibration part starts automatically after top view calibration. In order to combine each top view image, it is necessary that each shared point is at same position.

2.3 俯瞰映像の統合 ここでは各俯瞰映像を繋ぎあわせて真上から全周囲を俯瞰した映像を自動的に生成する。この処理を統合処理と呼ぶ。キャリブレーションの様子を図4(a)に示す。統合処理では俯瞰映像を繋ぎあわせていくが、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上で一致する性質を利用している。

また、図4(b)にキャリブレーションとその後の処理によって生成される提示映像の一例を示す。後処理については本節の終わりで概要を述べる。

統合処理はワールド座標系の中で各仮想カメラ座標を全て一致させることに相当する。座標変換には並進ベクトルと回転行列が必要であるが、回転行列については前節の各俯瞰映像生成で既に3次元空間上の回転行列の2軸成分を既に決定している。そのため、ここでは残りの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についての推定を行う。 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。

図4(c)は統合処理の概要であり、前後左右のカメラの俯瞰映像が並進と回転を繰り返して統合されていく様子が示されている。各俯瞰映像の左右にある青い4点は共有パターンの出力座標を表しており、これら4点の中心を赤い点で表している。この中心点を $\mathbf{c}_{k,l}$ と定義する。 l は映像中の中心点を区別する添字であり、左の点を $l=1$ 、右の点を $l=2$ とする。これより、各カメラ k の左右の中心点は前節で用いた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。

$$\mathbf{c}_{k,l} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \mathbf{p}'_{i,j}, \quad (10)$$

ただし $l=1$ のとき $i=1$ 、 $l=2$ のとき $i=N$ であり、 N は前節と同様に映像中のパターン数を意味している。

統合の処理はこの $\mathbf{c}_{k,l}$ をもとに行う。図4(c)に示すよう、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。

$$\mathbf{C}'_{k,l} = [\mathbf{R}_k | \mathbf{t}_k] \mathbf{C}_{k,l} = \mathbf{H}_{\text{int}k} \mathbf{C}_{k,l}. \quad (11)$$

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、最小化する。座標変換後の各中心点は $\mathbf{H}_{\text{int}k}$ の関数である。

$$\delta_{(\mathbf{H}_{\text{int}k})} = \sum_{k=1}^4 |c'_{(\mathbf{H}_{\text{int}k})k,2} - c'_{(\mathbf{H}_{\text{int}k})k-1,1}|, \quad (12)$$

ただし $\mathbf{c}'_{0,1} = \mathbf{c}'_{4,1}$ である。この関数に対して予め閾値を設定し、その値を下回るまで上記の座標変換を繰り返すものとする。

この俯瞰映像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ことができる。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。

$$\mathbf{H}_{\text{bird}k} = \mathbf{H}_{\text{int}k} \mathbf{H}_{\text{top}k}. \quad (13)$$

行列生成後に操作用映像とするための画像処理を行う。図4(b)に示すように魚眼映像と俯瞰映像との画素の対応関係を得ることでマスキング処理を行い、映像同士が重なり合わないようにする。また、中央に予め用意した建機の上からの写真を俯瞰映像に重畳することで、俯瞰映像に周囲環境だけでなく建機本体を表示させて操作時の臨場感を与える。

3. 実機検証

無人化施工の熟練者を被験者とし、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。実験はカメラ車映像と俯瞰映像との操作性の比較を目的とした。提示映像は図 2(b)と同様の映像（以降、前方映像）を主映像とし、俯瞰映像またはカメラ車を想定した映像（以降、カメラ車映像）を加えて提示した。前方映像単体での操作も行った。

3.1 システム構成 図 5, 図 6 に本実験のシステム構成を示す。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⁽¹¹⁾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 4 台の魚眼カメラ（オプト株式会社製 NM33）が設置されている。これらの映像が油圧ショベル内の PC へ取り込まれ、俯瞰映像と前方映像が生成される。モニタ上の GUI で選択した 2 つの映像が有線通信で操作室の PC へ送信され、2 台のモニタへそれぞれ提示される。魚眼映像の解像度は 640×480 pixel, 最大フレームレートを 15fps とした。提示映像の解像度は 512×512 pixel とした。俯瞰映像のフレームレートは 9fps となった。

なお、通信は周期の乱れや画質の影響を考慮して有線とした。操作卓に 21 インチのモニタを 2 台設置し、映像を組み合わせる際には両画面にそれぞれ映像を提示した。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。

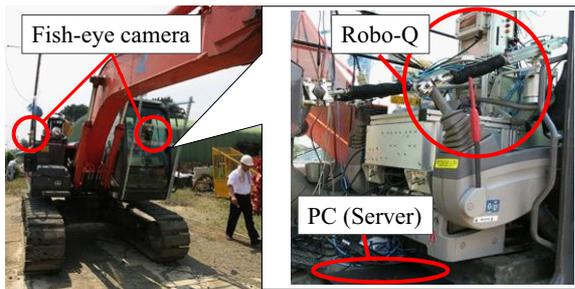


Fig. 5 Hardware system (backhoe).

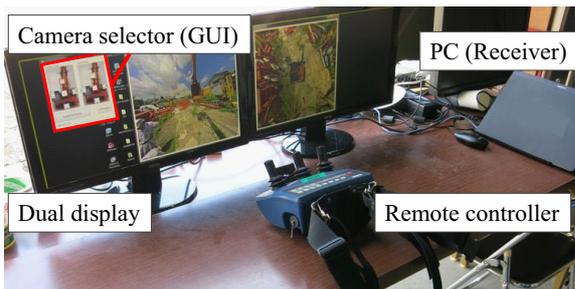


Fig. 6 Hardware system (teleoperation room).

3.2 実験方法 実験は災害対応を想定し、走行と模擬掘削を行った。実験の様子を図 7 に、実験の環境と概要を図 8 に示す。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位置に固定した。

まず、障害物環境下で走行実験を行う。この実験は建機が駐機位置から走行し、余裕が幅 0.5m の 2 つのコーンが置かれた狭い環境を方向転換しながら通り抜ける。安全に通ることを指示し、コーンへの衝突回数を評価指標とした。

次に、ライン走行停止実験を行う。作業時に建機の位置決め精度は重要である。障害物環境下走行後に設置されている停止ラインにクローラーを正確に合わせて停止する。微調整のための後進を一度までと指示し、左のクローラーの左上の角とライン原点とのずれ距離を評価指標とした。

最後に、バケット設置実験を行う。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。掘削を模擬したバケット設置実験では地面の設置マークの中心にバケットの爪を合わせる。建機の旋回動作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）とした。

繰り返し回数は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 回とした。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。映像は前方映像、前方映像とカメラ車映像、前方映像と俯瞰映像の 3 種類で行った。



Fig. 7 Example scene of experiment.

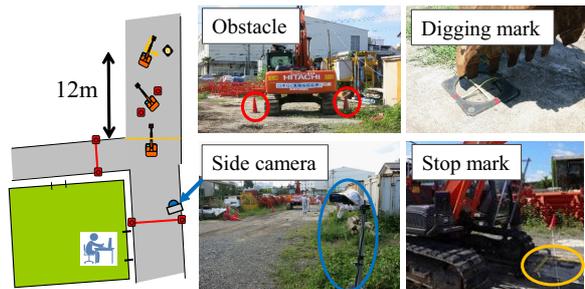


Fig. 8 Experimental outline.

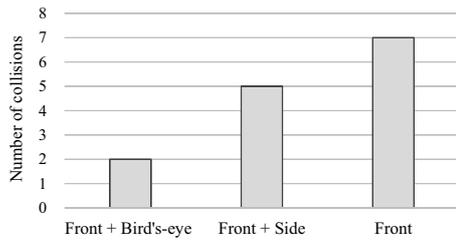


Fig. 9 Result of moving narrow path.

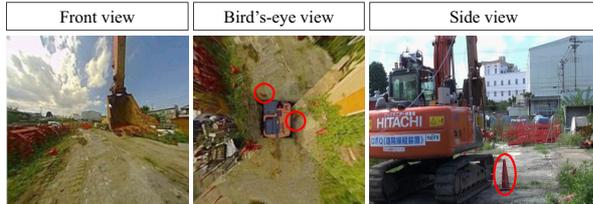


Fig. 10 Example images in moving narrow path experiment. Red circles indicate obstacles. Bird's-eye view can show both of obstacles.

4. 実験結果

被験者は無人化施工をはじめて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練習期間を1時間設けた。以下、障害物環境下走行、ライン走行停止、バケット設置の各実験の結果と考察を示す。

4.1 障害物環境下走行 図9に障害物環境下走行時の衝突回数の実験結果を示す。全8回の走行の内、コーンへ衝突した合計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10に示す。前方映像では画角が原因で両側のコーンが死角となっており、カメラ車映像では油圧ショベルで奥側コーンが隠れて死角となっていた。これ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。

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衝突した7個のコーンの内訳は手前が3個、奥側が4個であり、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。このことから死角となる領域は特に衝突の危険性が高まり、そのため死角を減らすことが建機の安全走行において重要であると考えられる。

この点で俯瞰映像は走行時に常に無死角で全周囲を表示できることからカメラ車に比べて有利と考えられる。

4.2 ライン走行停止 図11にライン走行停止時の停止精度についての実験結果を示す。全8回の停止位

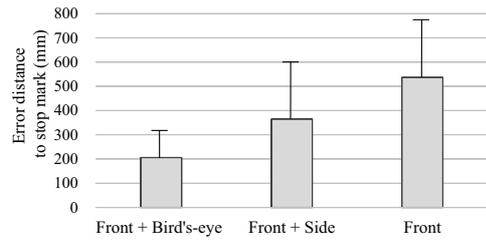


Fig. 11 Result of controlling stop position.



Fig. 12 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.

置のずれ量の絶対値の平均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かった。

ライン走行停止時の各映像を図12に示す。前方映像は画角が不十分で停止ラインが見えず、操作は勘で行われていた。カメラ車映像はクローラーの隙間からラインが一部映っていたが大部分は死角であった。これに対して俯瞰映像は無死角で油圧ショベルと停止ラインを相対的に表示できるため、視覚で操作が行えた。

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建機の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であると考えられる。

4.3 バケット設置 図13にバケット設置時の設置精度についての実験結果を示す。全10回のバケット設置位置の横ずれ量の絶対値の平均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かった。

バケット設置時の各映像を図14に示す。前方映像は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容易に把握可能であるが、奥行き方向（本実験では横ずれ方向）は把握困難である。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られるため位置合わせが行いやすい。高さ方向は把握しにくいですが、前方映像を組み合わせることで

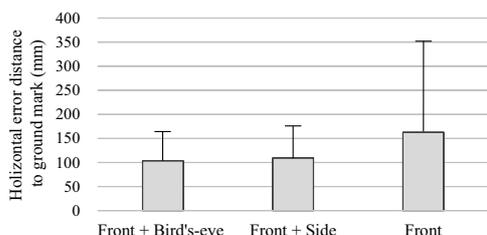


Fig. 13 Result of controlling basket.

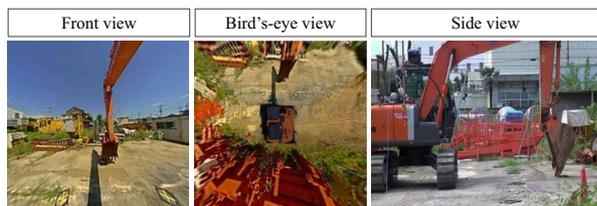


Fig. 14 Example images in controlling basket experiment. Bird's-eye view can estimate basket position.

精度向上が可能である。よって、俯瞰映像はカメラ車映像同様に前方映像と組み合わせることで精度の向上が期待できる。

バケット設置もカメラ車映像では撮影位置に精度が依存すると考えられるが、今回は最も現実的な位置に設置してある。奥行き方向の把握困難を解消するためには向かいからの撮影が最も良いが、掘削対象側にカメラ車を配置できるとは考えにくい。また、横に狭い環境では撮影位置は後ろからに限られるが、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。

以上から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カメラ車と同様に有効であると考えられる。

4.4 実験結果まとめ 俯瞰映像の操作性評価を目的とした。前方映像に対してカメラ車映像、俯瞰映像を組み合わせると各作業を比較した。

その結果、俯瞰映像は走行時の障害物の安全回避や建機の位置決め精度、掘削時の掘削の位置決め精度の点で有利であることが示された。俯瞰映像はカメラ位置によらず常に無死角で周囲を表示できるメリットから無人化施工の操作性向上に対して有効と考えられる。

5. 結 論

本研究では、無人化施工における俯瞰映像提示システムの開発を行った。簡便に俯瞰映像を生成するためのキャリブレーションを実装し、俯瞰映像提示システムを無人化施工用の油圧ショベルに組み込んだ。

また、俯瞰映像の操作性について評価実験を行った。その結果、俯瞰映像はカメラ車映像と比較した場合に、

走行時に障害物を安全に回避する点や建機の位置決め精度の点で有利であり、掘削時にも掘削の位置決め精度の点でカメラ車映像同様に有効であることが確認できた。以上から無人化施工における本手法の有効性を示すことができた。

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」、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。

参 考 文 献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Seiya Shimizu, Jun Kawai and Hiroshi Yamada, “Wraparound View System for Motor Vehicles”, *Fujitsu Scientific & Technical Journal*, Vol. 46, No. 1, (2010), pp. 95–102.
- (5) Yu-chih Liu, Kai-ying Lin and Yong-sheng Chen, “Bird's-Eye View Vision System for Vehicle Surrounding Monitoring”, *Robot Vision - RobVis*, (2008), pp. 207–218.
- (6) 佐藤貴亮, Alessandro Moro, 山下淳, 浅間一, “複数の魚眼カメラの時空間データによる全方位俯瞰画像生成”, 第 18 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, (2013), pp. 367–372.
- (7) 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.
- (8) 岡本寛也, Abdelaziz Khiat, 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.
- (9) Ciaran Hughes, Patrick Denny, Martin Glavin and Edward Jones, “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.
- (10) John Ashworth Nelder and Roger Mead: “A Simplex Method for Function Minimization”, *Computer Journal*, Vol. 7, (1965), pp. 308–313.
- (11) 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.