

## 2. 無人化施工における俯瞰映像システムの開発

株式会社フジタ ○野末 晃  
三村 洋一  
小幡 克実

### 1. はじめに

2011年の東日本大震災をはじめとし、わ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設機械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。その要因として視覚の問題が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<sup>1)</sup>。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問題解決が極めて重要である。

現在の無人化施工は、安全な区域にある遠隔操作室から危険区域にある建設機械を搭載カメラと移動カメラ車や固定カメラの映像を見ながら遠隔操作している。

本論文ではこの移動カメラ車や固定カメラの映像の代わりに魚眼レンズカメラによる俯瞰映像を利用した新たな試みを提案し、俯瞰映像の特性評価を報告するものである。なお魚眼レンズカメラを用いた俯瞰映像提示システムは、東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻の浅間研究室で研究開発しているもので、建設機械への搭載実験を当社と共同研究している。

### 2. 魚眼レンズカメラによる俯瞰映像

#### 2.1 開発の目的

従来の遠隔操作のための映像提供は車載カメラ1~2台と外部環境としての固定カメラ2~3台、移動カメラ2台の組み合わせが主流である。本格的な復旧工事であれば工期も予算も豊富で良いが緊急対応工事には適さない。そこで外部環境用映像の代替手段として最近自動車の駐車誘導ツールとして開発されたアラウンドビューモニターの原理を利用して、建設機械に簡易に取り付けが可能な俯瞰映像提示システムを開発した。

#### 2.2 魚眼レンズカメラによる俯瞰映像の概要

固定カメラや移動カメラの代わりに建設機械の前後左右4方向に取り付けた魚眼レンズカメラの映像を合成し、擬似的に建設機械を上から眺めた映像を生成し遠隔操作者に提示する。また搭載カメラの映像も正面に取り付けた魚眼レンズカメラの映像から正射影に投影した映像を作成して提示する。

さらに通常搭載カメラが2台ある場合は、掘削箇所とブーム全景の映像と足元やバケットのズーム映像の組み合わせとなる。これを魚眼レンズカメラ1台の映像でカメラの画角や方向を画像処理により自由に変更することが出来る。当然、カメラを切り替えることも不要で同時に複数の映像を表示することが可能である。

図-1に俯瞰映像提示システムのイメージを示す。

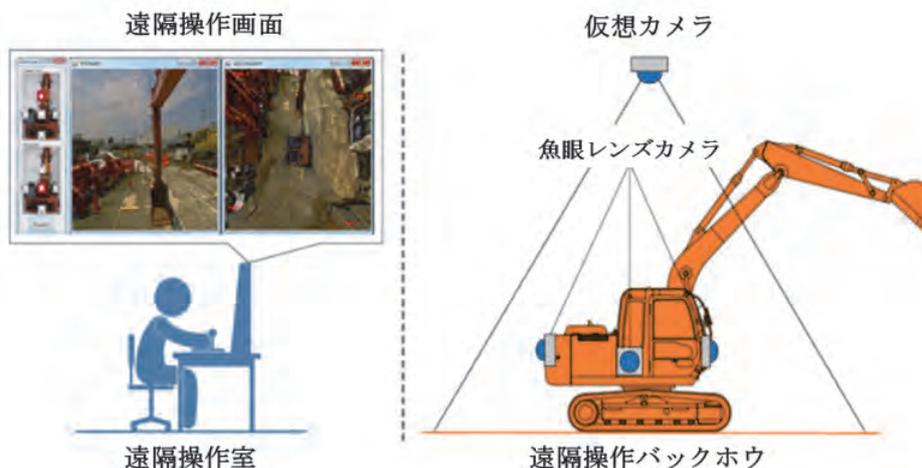


図-1 俯瞰システムの概念

図-2 に魚眼レンズカメラのオリジナル画像と合成後の俯瞰画像を示す。

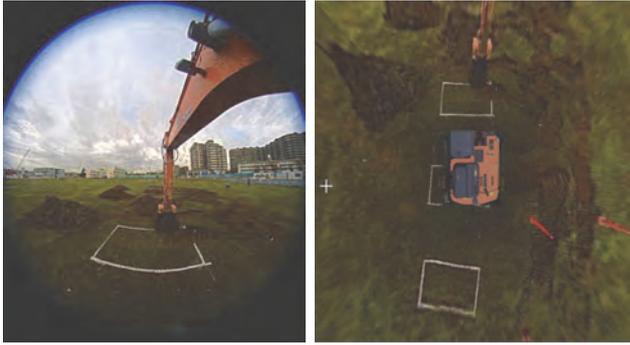


図-2 魚眼レンズカメラ俯瞰映像

建機の前左右に取り付けた後の方向調整が合成精度に関わる重要な作業である。図-4 に魚眼レンズカメラの取り付け、図-5 に方向調整用画面と調整作業状況を示す。



図-4 魚眼レンズカメラの取り付け

### 2.3 俯瞰映像の生成フロー

俯瞰映像生成のフローを図-3 に示す。

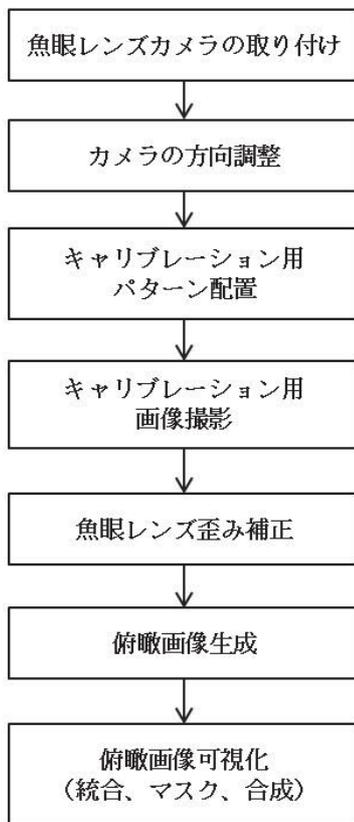


図-3 俯瞰映像生成フロー

今回採用している魚眼レンズの仕様を表-1 に示す。

表-1 魚眼レンズカメラの仕様

インターフェース	USB1.1	映像素子	CMOSセンサー
画像圧縮方式	JPEG	画素数	170万画素
解像度	640×480	最大フレームレ	最大15fps
	1536×1536	視野角	180°
焦点距離	10mm~∞	動作環境	温度0℃~40℃、湿度20%~80%

キャリブレーション作業は魚眼レンズカメラを

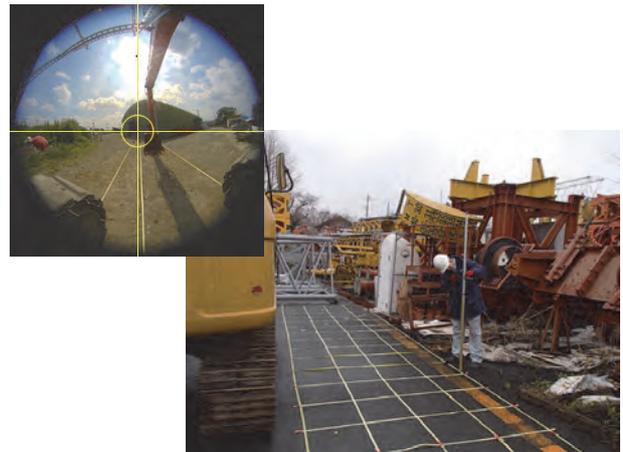


図-5 方向調整用画面と調整作業

実験当初はキャリブレーション作業のために地面に格子枠線を引いていたが作業時間も多大で実験の度に線を引きなおす手間が課題であった。(図-6 参照) 現在は、図-7 のようにパターン標識板を作成し、ある条件下の元で任意の場所に置く方法に改良した。

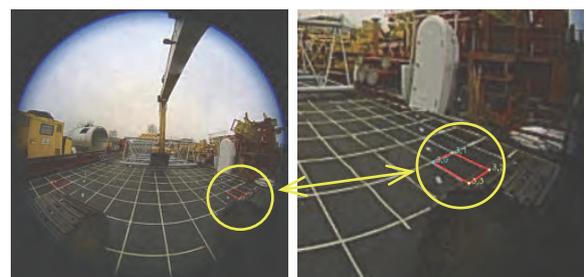


図-6 キャリブレーション用格子枠線

図-7に各方向のキャリブレーション用画像を示している。建機の四隅に正方形のパターン標識板を置き、図-5の方向調整用モニターで2枚ずつ標識板が写るように位置を調整してから撮影する。撮影した各画像を図-3のフローに従いキャリブレーションを行う。レンズの歪み補正後にホモグラフィ行列による射影変換を行い4画像に統合する。これら各変換式のパラメータを建機のPCに投入することで、リアルタイムに俯瞰画像が生成されモニタに表示される。

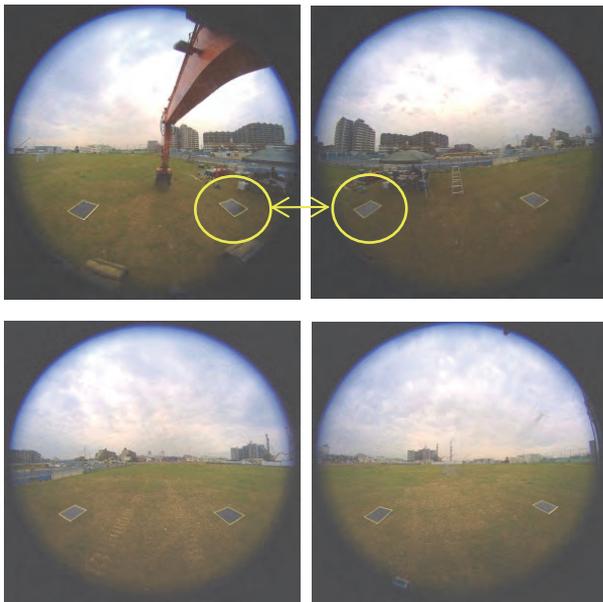


図-7 キャリブレーション用画像

掘削作業用に追加した前方の魚眼レンズカメラ画像を正射影変換した画像と完成した俯瞰画像を図-8に示す。なお俯瞰画像生成の詳細は文献<sup>3)</sup>に記載されている。



図-8 掘削用前方画像と完成後の俯瞰画像

## 2.4 俯瞰映像の特性調査

俯瞰映像を用いた油圧ショベルの遠隔操作の評価実験は、工場敷地内において基礎実験（2013年5月）と造成現場において障害物走行・掘削作業実証実験（2013年11月）をおこなっている。これらは文献<sup>3)</sup>で詳細に報告されているので、ここでは当初から懸念事項であった項目の調査結果を報告

する。

### 2.4.1 基礎実験での特性調査

以下の5つの懸念事項に関して調査実験を行った。図-9に実験状況を示す。

- ① 地盤の傾斜に対する認識
- ② 地盤の段差に対する認識
- ③ 車体の傾きに対する認識
- ④ 車体の振動に対する認識
- ⑤ 遠隔操作が可能な表示遅延量か

調査実験の結果、以下のことが判明した。

- ① 車体から遠いほど高さが誇張されるが傾斜していることは認識できる。
- ② 地面から80cmの高さの場合、約長さ2倍、面積4倍に誇張されることが判明した（図-10の左図参照）。これは遠近感としては過大表示になる傾向である。
- ③ 認識は可能である。
- ④ 認識は十分可能である。
- ⑤ 1,100msの遅れがある。ビデオコンバータと無線LANの遅れが350msとして俯瞰映像生成処理遅延は750msと推定される。文献<sup>4)</sup>によると映像伝送の遅れは1.5秒が限界とされていることから1.1秒は評価できる値である。

なお、評価方法は①から④については各条件のもと俯瞰映像の画面を録画し、それを再生して定性的に評価した。⑤表示遅れの測定方法は文献<sup>2)</sup>と同じ測定方法で測定した。PC-Tの画面に時間とフレーム番号を表示させて、魚眼レンズカメラで撮影したビデオ信号を俯瞰画像生成サーバPCに取り込み、生成した俯瞰映像をクライアントPCに伝送する。クライアントPCが俯瞰映像を表示している画面とPC-Tの画面が両方映るようにビデオカメラで撮影し録画する。録画した映像を1コマずつ再生してフレーム番号の差を記録することで測定した。PC-Tの表示間隔が60Hzとビデオ録画を60fpsに合わせれば1コマ16.7msの分解能で計ることができる。（図-11, 12参照）



図-9 俯瞰映像の特性調査実験



図-10 俯瞰映像の段差認識

### 2.4.2 走行・掘削実験での特性調査

走行・掘削実験においても懸念事項の調査実験を行った。基礎実験から6ヵ月経過しているためソフトの改良とビデオコンバータの開発により良い結果が得られた。改良点は、俯瞰映像生成と映像の圧縮・伸張処理の処理速度向上である。

①～④に関しては俯瞰映像の採用する範囲を約2倍に拡大したため高低差の誇張が緩和された。これにより視野が拡張されリスクの認識が速まり安全性も向上した。(図-10の右図参照)

また、俯瞰画像の表示遅延は700ms程度となり400msの短縮が実現した。この内訳は、ソフト改良：60ms、高速PCの置換え：140ms、新規ビデオコンバータ：200msである。ソフト改良の効果が少ないのは魚眼レンズカメラのインターフェースが低速のUSB1.1であるためである。フレームレートが15fpsと低いのはインターフェースが原因と思われる。

図-12に走行・掘削実験の環境を再現した表示遅延量測定状況を示す。また、今回開発したビデオコンバータの仕様を表-2に記す。図-11に遅延量計測で50msを達成した状況を示す。

表-2 ビデオ変換機の詳細

インターフェース	HDMI
画像圧縮方式	H.264
解像度	1360×768
最大フレームレ	30fps
遅延量	50～100ms



図-11 ビデオ変換機の遅延測定

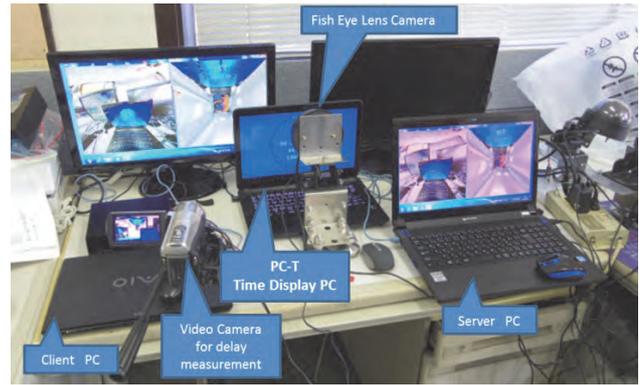


図-12 俯瞰映像の遅れ測定

## 2.6 特性評価のまとめ

俯瞰映像が遠隔操作で作業ができるかは文献<sup>2)</sup>で時間と精度で検証され、障害物走行に有効であるとしている。今回はその実証実験での課題や俯瞰映像特有の懸念事項について調査実験をおこなった。地山の状況の把握や車体の傾きの認識に関しては、問題が無いことが分かり、俯瞰映像の遅延量が700msであることから遠隔操作作業が可能であると判断した。

遅延量の減少を阻害している魚眼レンズカメラを高速版に換えることで遅延量減少とフレーム数(fps)が向上する可能性を見出した。

## 3. 俯瞰映像提示システムの高速化

### 3.1 表示遅延の要因調査

さらに遅延時間を減少させるためには、俯瞰映像の表示遅延の要因調査を行うことに効果があると考えた。図-13に遅延の要因毎に分けた構造図を示す。但し屋内試験のため有線で実施したので、無線伝送とH.264の伝送装置の遅延は含まれない。

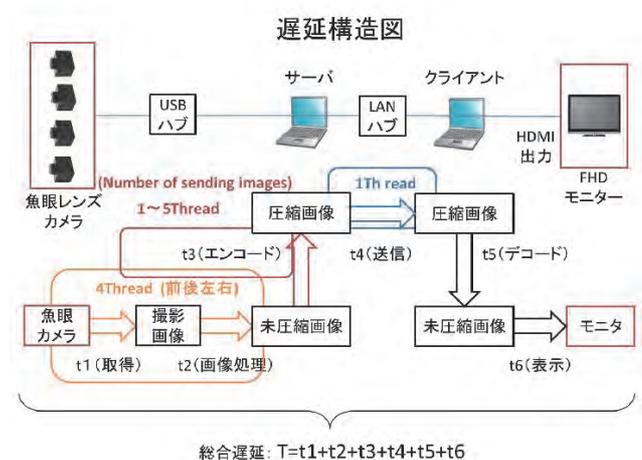


図-13 遅延構造図

以下の6要素の測定を行った結果、推測どおり魚眼レンズカメラの画像取得の処理時間が多いことが判明した。

- 1) 画像取得 t1 = 150ms
- 2) 画像処理 t2 = 70ms
- 3) エンコード t3 = 65ms
- 4) 送受信 t4 = 10ms
- 5) デコード t5 = 40ms
- 6) 画像表示 t6 = 40ms

総合遅延 T=t1+t2+t3+t4+t5+t6 = 375ms

### 3.2 魚眼レンズカメラの変更

画像取得処理時間を短縮するために魚眼レンズカメラを USB3.0 のインターフェースの製品に変更することにした。また魚眼レンズもカメラに適合するレンズに変更した。表-3 にカメラとレンズの仕様を示す。図-14 にレンズとカメラの組立状況を示す。

表-3 レンズとカメラの仕様

レンズ仕様		カメラ仕様	
焦点距離	1.4mm	インターフェース	USB3.0
絞り範囲	F1.4~F16	映像素子	CMOSセンサー
フォーカス	固定	画素数	130万画素
アイリス	手動	解像度	1280×1024ピクセル
画角	185° (φ4.6mm)	最大フレームレート	最大60fps
使用温度	-10℃~+50℃	使用温度	0℃~45℃



図-14 USB3.0 魚眼レンズカメラ

## 4. テレビ会議用2眼合成カメラ映像の取り組み

最近、テレビ会議用に販売された2つのカメラレンズを合成して歪みの少ない180°画角を実現したWEBカメラを利用して遠隔操作に与える効果を検討した。

### 4.1 カメラの仕様とソフト開発ツール

今回採用したWEBカメラの仕様を表-4に記す。インターフェースとしてUVC (Universal Serial Bus Device Class) に対応しているため開発ツール【Microsoft Visual C++ 2010 Express Edition OpenCV2.4.8(画像処理ライブラリ)】で簡易に取り込み表示ソフトを開発することができた。

表-4 カメラの仕様

インターフェース	USB2.0	映像素子	CMOSセンサー
動画フォーマット	MJPEG, YUY2	画素数	60万画素
解像度	1280×480ピクセル	最大フレームレート	最大30fps
フォーカス	固定	視野角	180°
焦点距離	70cm~∞	動作環境	温度5℃~40℃、湿度20%~80%

また、縦置きに設置した場合の90°回転も数行のプログラム変更で可能である。

### 4.2 横に2台並べた方法

掘削作業用の映像と走行時の足元を映すための映像を上下2段に配置した状況を図-15に示す。上段の映像は歪みも少なく180°見渡せる。下段の映像は下向きに取り付けたためやや違和感がある。左右の映像の合わせ目はほとんどわからない。なお上下の画像は特に処理をしていないためずれている。



図-15 2眼合成カメラレイアウト1

図-15ではブームが映らないのでブーム全体が映るように向きと位置を調整したのが図-16の映像である。この映像は自然で違和感がない。



図-16 2眼合成カメラレイアウト2

### 4.3 縦横に1台ずつ取り付ける方法

1台はブーム全体を映すために縦向きに取り付けてみた。(図-17参照) 1台のディスプレイに同時の表示したため、縦長の映像が小さくなってしまい解像度もすくない。2台のディスプレイに分け

て表示してみないと評価できない。

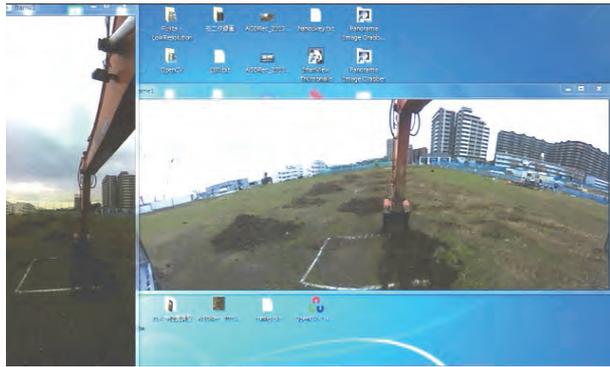


図-17 2眼合成カメラレイアウト3

#### 4.4 横に2台並べるが1台は運転席内に取り付け

1台はオペレータの目線を確保するため運転席に取り付け、もう1台は足元のキャタピラ部が映る下向きに取り付けたのが図-18である。意外とオペレータには乗車している感覚があり好評であった。下の映像の縦の幅が広くなればよさそうである。



図-18 2眼合成カメラレイアウト4

#### 4.5 本検討のまとめ

テレビ会議用2眼合成カメラの遠隔操作の採用とカメラの配置や向きについて検討した。取扱いや開発の容易さからかなり期待が持てる。今回はレイアウト検討だけであるが俯瞰映像と合わせて可能性を十分感じた。また、HDMI出力機能の画角170°のカメラも検討していく予定である。

#### 5. おわりに

今回の特性評価実験は汎用油圧ショベルに外付け式の簡易遠隔操縦装置（九州地方整備局技術事務所と当社の共同開発）を搭載して行った。この装置との組み合わせで遠隔操縦専用機がなくても無人化施工が可能で、固定カメラや移動カメラ車等の設備が不要になることから早期工事の着手が

可能となるのが最大の強みである。すなわち魚眼レンズカメラによる俯瞰映像を利用した遠隔操作は、簡易遠隔操縦装置との組み合わせで緊急対応における復旧工事に有効であることが確認された。

今後は、魚眼レンズカメラの高速版に変更して遅延量を500ms以下に短縮することを目標に開発を続けていく予定である。また、掘削用の前方映像の画角や方向を画像処理技術の利用で自由に変更できる機能を追加する予定である。この機能があれば、掘削作業中は掘削箇所を、走行中は足元を、ダンプへの積み込み時は荷台の上方へと3台のカメラを1台のカメラで賄うことができるようになる。これらの開発後に今年の12月に雲仙普賢岳で実地検証する予定である。

2011年3月の東日本大震災以降、災害対策に関する研究開発の公募が急に増えているので、今後様々な技術開発が進むであろう。本稿が参考になれば幸いである。

本稿を作成するにあたり、東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻の浅間先生、山下先生及び研究室の方々とライテックス岡本氏、テレパワー鈴木氏、(株)フジタ東京支店津田沼区画整理作業所にご協力を頂きました。記してお礼を申し上げます。

#### 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, pp. 373-374, 2004
- 2) 野末晃, 三鬼尚臣, 三村洋一, 藤岡晃, 組田良則: “携帯電話通信による超長距離遠隔操作の可用性検証について”, 第13回建設ロボットシンポジウム論文集, Vol. 13, pp. 75-84, 2012
- 3) 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擬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
- 4) 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”, 第13回建設ロボットシンポジウム論文集, Vol. 13, pp. 41-50, 2011
- 5) 三村洋一, 三鬼尚臣, 野末晃, 小幡克実: “無人化施工における映像と通信の関係について”, 第14回建設ロボットシンポジウム論文集, Vol. 14, pp. 29-38, 2014