

## 6. 無人化施工におけるモニタ画像の向上について

国土交通省	関東地方整備局	関東技術事務所	○ 稲垣 義明
国土交通省	関東地方整備局	関東技術事務所	加藤 浩志
国土交通省	関東地方整備局	大宮国道事務所	宮野 博匡

### 1. はじめに

近年、地震、台風等により土砂崩れ、道路の寸断、河道閉塞など災害が多く発生している。

災害時の初期における現場での復旧作業は、主に現場への進入路の確保や障害物撤去などが考えられ、それらの作業は迅速かつ効率的に行う必要があるが、現場条件によっては二次災害防止の観点から、遠隔操作式バックホウなど無人化施工機械による復旧作業も想定される。

しかし、遠隔操作時の復旧現場への移動や現場作業については車載カメラからの映像により行っているため、オペレータ搭乗時に比べ視認性不足等により作業効率は低下する。

そのため、遠隔操縦時の作業効率の向上を目的として、平成 29 年度より関東技術事務所で保有している遠隔操縦式バックホウを使用し、現在実用化されている映像技術の活用による視認性の向上について、実用性の検証を実施した。

平成 29 年度は、施工時に必要となる「前方映像」と、走行時や周辺状況を確認するために必要となるやや上方からの広範囲な映像として上部から斜め前方を見下ろした「鳥瞰映像」や真上から見下ろした「俯瞰映像」について、カメラの画質や画角を重点に実用化されている技術について抽出し、実用性の検証を実施した。

検証は、検証ヤード上でモニタ画面のみでの遠隔操作による模擬作業を実施した。

検証結果より、ハイビジョン動画 (1,920×1,080) で伝送可能な車両搭載型制御カメラを使用して、鳥瞰映像用にバックホウキャビン後方上部の左右に 1 台ずつ設置（以下、設置したカメラを鳥瞰カメラという）したものと、前方映像用にキャビン上部に 1 台設置（以下、設置したカメラを HD 車載カメラという）したものを組合せた映像技術（以下、鳥瞰映像システムという）と、ハイビジョン動画

（約 92 万画素）で伝送可能なカメラを使用して、バックホウ機体の前後左右に 1 台ずつ設置してこれらの映像を合成し俯瞰映像としたものと、HD 車載カメラ 1 台を組合せた映像技術（以下、俯瞰映

像システムという）の 2 映像技術について視認性の向上に有効であると確認された。

本報告は、平成 29 年度検証（以下、過年度検証という）にて有効性が確認された 2 映像技術について、引き続き平成 30 年度に実用性の検証を実施したのでその結果について紹介する。

### 2. 実用性の検証

#### 2.1 検証の概要

過年度検証では、鳥瞰映像システム及び俯瞰映像システムの有効性が確認されたが、操作オペレータは遠隔操作式バックホウの操作実績のある熟練オペレータ 1 名により検証を実施したため、本検証ではオペレータの熟練度の違いによる視認性及び操作性について再度検証を実施し、2 映像技術の有効性について確認した。

また、併せて操作用モニタの配置の違いによる視認性及び操作性について検証を実施し、最適なモニタ配置方法を決定した。

#### 2.2 検証の方法

##### (1) 検証コース走行による検証

操作用モニタを見ながら遠隔操作で検証コースを 3 回走行し、その走行時間による走行性により、視認性及び操作性について検証を実施した。

検証コースは、過年度検証に使用したコースと同じものを造成し、図-1、写真-1 に示すとおり、直線、盛土障害物、クランク（4 回）を組合せたコースとした。

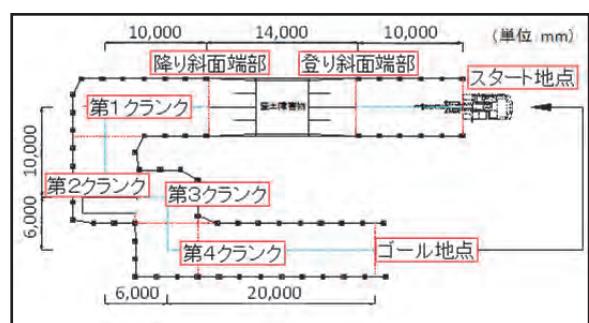


図-1 検証コース（平面図）



## (2) ヒアリング調査による検証

検証コース走行後に、操作用モニタの見やすさについてオペレータへヒアリング調査を実施した。

ヒアリング結果については、4段階（優5点、良2点、可1点、否0点）により得点化することで評価することとした。

なお、非熟練者については、無人化施工機械の操作者として配置された場合の作業効率を考慮し、評価点について重み付けを行い、段階評価点を熟練者の2倍とした。

## 2.3 検証技術

### (1) 鳥瞰映像システム

本システムは、上から斜め前方に見下ろす鳥瞰映像により、より広角に前方方向の視認に有効である。

しかし、バックホウ機体にカメラ用取り付け架台の設置が別途必要となるため、過年度検討においてはこの取り付け架台の設計を実施した。

各カメラの設置状況を写真-2に、モニタ表示画面を写真-3に示す。

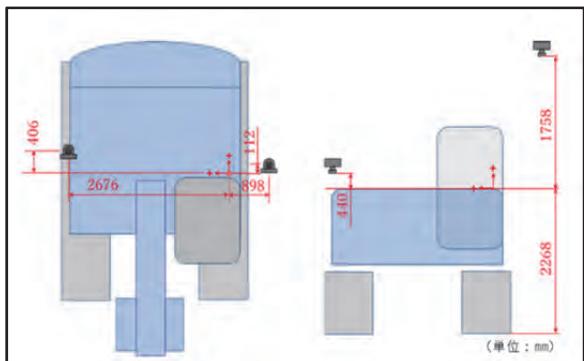
なお、鳥瞰カメラの設置位置については、過年度検証において視認性を考慮し、最適な位置を決定しているが、今回使用したカメラは広角度性能が向上（水平画角86.5度（+22.8度の向上））した新型を使用したため、再度、設置位置を検討し、過年度検証と同等以上の画角となることを確認（写真-4）のうえ左鳥瞰カメラの位置のみ変更し、図-2に示す位置とした。



写真-3 モニタ表示画面（左から、左鳥瞰映像、HD車載映像、右鳥瞰映像）



写真-4 左鳥瞰カメラ映像（左から過年度検証時の画角、本検証時の画角）



### (2) 俯瞰映像システム

本システムは、機体真上から見た俯瞰映像により、機体全周方向の視認に有効である。

各カメラの設置状況を写真-5に、各カメラ映像によるモニタ表示画面を写真-6に示す。

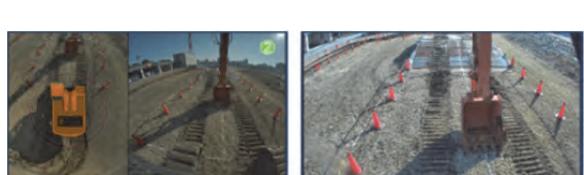


写真-6 モニタ表示画面（左から、俯瞰映像、HD車載映像）

## 2.4 被験者

被験者は、無人化施工機械の操作の熟練度を考慮して、熟練者3名、非熟練者3名の合計6名とした。

## 2.5 モニタの配置構成

モニタ配置構成については、表-1に示すとおり、鳥瞰映像システムは配置①、配置②、配置③の3種類、俯瞰映像システムは配置④、配置⑤の2種類とした。

また、モニタは図-3に示すとおり、遠隔操作を行うオペレータの視線に対し、鉛直方向に70度、水平方向に90度の範囲に配置し、安定注視野と頭部運動を考慮した配置とした。

なお、視線の高さは、オペレータの身長、座高等個人により異なるため、無段階に高さ調整ができる椅子を使用した。

表-1 モニタ配置構成一覧

映像システム	モニタ配置	モニタ配置構成	カメラ構成
鳥瞰映像	配置①	左鳥瞰映像 右鳥瞰映像 車載映像	HD車載カメラ 1台 鳥瞰映像用カメラ 2台
	配置②	車載映像 左鳥瞰映像 右鳥瞰映像	
	配置③	左鳥瞰映像 車載映像 右鳥瞰映像	
俯瞰映像	配置④	俯瞰映像 車載映像	HD車載カメラ 1台 俯瞰映像用カメラ 4台
	配置⑤	車載映像 俯瞰映像	

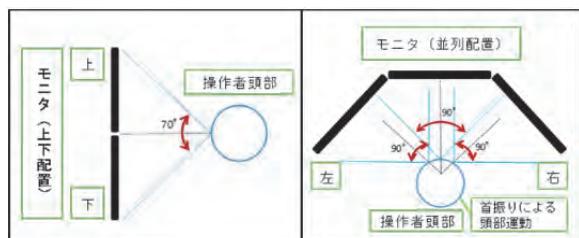


図-3 モニタ配置図 (左から垂直方向, 水平方向)

## 2.6 検証結果

### (1) 鳥瞰映像システム

モニタ配置構成の配置①、配置②、配置③について、検証コースによる走行による検証及びヒアリングによる検証結果を以下に示す。

#### ① 検証コース走行による検証

検証結果を表-2に検証状況を写真-7に示す。

表-2 検証コース走行による検証結果 (鳥瞰映像)

映像システム	鳥瞰映像					
	被験者区分			非熟練者		
モニタ配置	平均(3回)			平均(3者)	標準偏差	
	A	B	C			
配置①	2分8秒	2分2秒	2分4秒	2分4秒	2秒	
配置②	2分6秒	2分5秒	2分5秒	2分5秒	0秒	
配置③	2分12秒	2分9秒	2分7秒	2分9秒	2秒	
被験者区分	熟練者					
	平均(3回)			平均(3者)	標準偏差	
検証番号	D	E	F			
	1分58秒	2分4秒	1分58秒	2分0秒	3秒	
配置①	1分58秒	2分8秒	1分59秒	2分2秒	4秒	
配置③	1分57秒	2分8秒	2分0秒	2分1秒	5秒	



写真-7 検証状況 (左から配置①, 配置②, 配置③)

平均走行時間からは熟練者についてはいずれも差はほとんどなかったが、非熟練者については、配置①と配置②と比較して配置③に差異が見られた。

また、非熟練者と熟練者との平均走行時間については、大きな差は見られなかった。

### ② ヒアリング調査による検証

評価結果を表-3に示す。

配置①が非熟練者、熟練者ともに高い評価となつた。

また、オペレータへのヒアリング結果を整理したもの下記に示す。

- モニタの大きさに対しては、大小等の意見はなかった
- 主に左右の鳥瞰カメラによる映像を見て操作し、車載カメラによる映像はバックホウ全体の位置合せ等の補助的なものとして使用した
- 頻繁に確認するモニタについては、下段にある方が見やすい
- 左鳥瞰映像が盛土障害物の通過時にぶれが大きくて見づらい

表-3 ヒアリング調査による評価結果 (鳥瞰映像)

映像システム	鳥瞰映像						(単位:点)
	被験者区分			小計		合計	
検証番号	A	B	C	D	E	F	
	10	10	4	24	2	5	9
検証①	10	10	4	24	2	5	9
検証②	4	4	4	12	2	2	6
検証③	2	2	10	14	2	1	5
							22

## (2) 俯瞰映像システム

### ① 検証コース走行による検証

検証結果を表-4に検証状況を写真-8に示す。

表-4 検証コース走行による検証結果（俯瞰映像）

映像システム	俯瞰映像					
	被験者区分			非熟練者		
検証番号	平均(3回)			平均(3者)	標準偏差	
	A	B	C			
配置④	2分9秒	2分5秒	2分17秒	2分10秒	5秒	
配置⑤	2分7秒	2分7秒	2分8秒	2分7秒	0秒	
オペレータ区分						
検証番号	平均(3回)			平均(3者)	標準偏差	
	D	E	F			
配置④	2分7秒	2分21秒	2分3秒	2分10秒	8秒	
配置⑤	2分6秒	2分19秒	2分5秒	2分10秒	6秒	

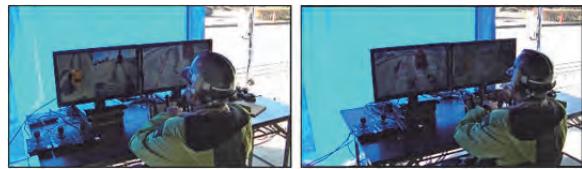


写真-8 検証状況（左から配置④、配置⑤）

平均走行時間については、非熟練者及び熟練者において配置⑤、配置④の順となった。

非熟練者と熟練者との平均走行時間については、大きな差は見られなかった。

### ② ヒアリング調査による検証

評価結果を表-5に示す。

配置④が非熟練者、熟練者ともに高い評価となった。

また、オペレータからのヒアリング結果を整理したものを下記に示す。

- モニタの大きさに対しては、大小等の意見はなかった
- 操作は俯瞰映像を見て操縦、車載カメラによる映像はほとんど見ていない
- バックハウの周囲全体が見えるため、操作しやすい
- 映像のブレが少なく操作しやすい

表-5 ヒアリング調査による評価結果（俯瞰映像）

映像システム	(単位:点)									
	俯瞰映像									
	被験者区分			非熟練者			小計	非熟練者		
検証番号	A	B	C	D	E	F		小計	合計	
検証④	4	4	4	12	5	5	15	27		
検証⑤	4	4	4	12	2	5	5	12	24	

## 3. 考察

### ① 鳥瞰映像システム

本検証により、モニタ画像による無人化施工機械の遠隔操作時の車載映像、左鳥瞰映像及び右鳥瞰映像について、それぞれの役割が判明したので、その内容について下記に示す。

#### ① 車載映像の役割

- バックハウ走行時や掘削等の作業時には、前方を視認し、障害物の有無を確認できる
- フロント部（ブーム、アーム、バケット）の状態を確認し、安全な走行状態であるか、異常はないかを確認できる
- 地面とフロント部の離隔を確認できる

なお、この車載映像内で左右の履帯の先端を視認できれば安全性が確保でき、さらに有効である。

#### ② 左鳥瞰映像の役割

- 左方向の視野を広げ、障害物の有無やバックハウ左側の離隔が確認できる
- 高い位置にカメラを設置しているため、キャビンの影響を受けず前方が視認できる
- 機体から張り出した位置にカメラを設置しているため、バケットに対して、少し斜め方向からの映像となり、奥行き方向の深度認識の補完ができる



写真-9 車載映像の役割



写真-10 左鳥瞰映像の役割

### ③ 右鳥瞰映像の役割



写真-11 右鳥瞰映像の役割

- ・右方向の視野を広げ、障害物の有無を確認ができる
- ・ステップ付近にカメラを設置しているが、キャビンの影響を受けず、前方が視認できる
- ・オペレータがキャビン内で操作する目線の高さにカメラを設置しているため、カメラの設置位置を高くした場合に比べ、高さ方向の誤差が少なくなり、高さ方向の補完ができる

### (2) 俯瞰映像システム

俯瞰映像システムは、車載映像を併用することにより、バックホウのフロント部の視認性が補完でき、画像合成による距離感は一定で、映像画質も良く、画像合成ソフトの安定性は高いと考えられる。

非熟練者及び熟練者の複数人のオペレータによる検証コース走行による検証結果においても、走行時間に大きな差や偏りは現れなかったことから、無人化施工機械の遠隔操作熟練度によらず、バックホウ走行時には実用性の高いシステムと考えられる。

掘削作業においては、高い精度を必要としない現場には実配置が可能と思われるが、バケット位置の距離感を認識するためには、鳥瞰や外部カメラ等による情報の補完が必要であると考えられる。



写真-12 俯瞰映像システム（合成映像用 前方カメラ）



写真-13 俯瞰映像システム（合成映像）

また、画像合成技術により、バックホウの全周囲の状況を、継ぎ目なしに画像で確認できるので、狭隘な場所や、遠隔操作時において操作者から死角となる障害物等があるような環境下での移動ガイダンスに適していると考えられる。

### (3) モニタ配置構成

#### ① 鳥瞰映像

検証コース走行による検証では、個人差が若干見受けられるものの、無人化施工機械の遠隔操作経験の有無による顕著な差は、走行時間に現れるることはなかった。

モニタの配置は3種類の配置で検証したが、配置①のモニタ配置が良い結果となった。

また、非熟練者については、配置①と配置②と比較して配置③に差異が見られたが、これは配置③は車載カメラ映像を中心とし、その両側に左右の鳥瞰カメラ映像を配置したこと、鳥瞰映像を確認する際の左右の首振り動作に要する時間が影響したためと考えられる。

そのため、複数のモニタを並列に配置する場合は、首振りによる頭部運動を抑えるよう配慮することが重要であると考えられる。

各検証後にオペレータヘビアリングを実施して判明したことは、バックホウ走行時にはキャビン上部に設置した車載映像は、検証コースとの位置を把握するために補助的に使用しているだけであるのに対し、左右の鳥瞰映像からは、機体と検証コースの離隔や履帯の位置確認等、走行時に必要な情報のほとんどを得ていることがわかった。

これは走行時における移動ガイダンスとして、バックホウの両脇の離隔が認識しやすく、前方視認性、左右の履帯の視認性が優れている鳥瞰映像が有効であると考えられる。

モニタは、今回の検証では24インチのサイズ

を使用したが、大きさの大小には特に過不足のない意見であった。

以上のことから、鳥瞰映像システムにおけるバックホウ走行時に最適なモニタ配置の要素として、以下に示す。

これらの事項に配慮して、モニタ配置することが重要であると考えられる。

- ・鳥瞰モニタは、なるべく近い位置の左右に配置する
- ・鳥瞰モニタを、車載映像等の他のモニタと上下に配置する場合は、下段に配置する
- ・鳥瞰モニタの他に、複数のモニタを使用する場合は、オペレータが首振りによる頭部運動をした時に、モニタと正対するように配置する
- ・各映像カメラは、バックホウの挙動による画像のブレ等の影響が少なくなるように設置する
- ・各モニタは、オペレータの水平目線に対して、鉛直方向 70 度、水平方向 90 度の安定注視野内に配置する

## ② 俯瞰映像

検証コース走行による検証では、個人差が若干見受けられるものの、無人化施工機械の遠隔操縦操作経験の有無による顕著な差は、走行時間に現れることはなかった。

モニタの配置は 2 種類の配置で検証したが、配置④のモニタ配置が良い結果となったが、ヒアリングによる結果からはどちらも差がなく、これはモニタ画面を車載映像と俯瞰映像の 2 台構成としたことで、視線移動が少なく、移動ガイダンスに必要な情報が速やかに得られたためではないかと考えられる。

各検証後にオペレータへヒアリングを実施して判明したことは、バックホウ走行時には機体正面の車載映像は、ほとんど見ていないのに対し、俯瞰映像からは、機体の全周囲と検証コースの離隔や履帶の位置確認等、走行時に必要な情報のほとんどを得ているのが判明した。

これは、走行時における移動ガイダンスとして、前方及び全周囲の視認性が優れていることと、左右のコースとの離隔が識別できる俯瞰映像が有効であると考えられる。

のことから、俯瞰映像システムにおける俯瞰モニタの最適配置は、車載映像等の他のモニタと配置する場合は、オペレータの正面に配置し、各モニタは、オペレータの水平目線に対して、鉛直方向 70 度、水平方向 90 度の安定注視野内に配置することが重要であると考えられる。

また、俯瞰映像からは、バックホウの移動時に必要な情報の多くを得られることから、上記で述

べた安定注視野の範囲に留意して、大型モニタを使用することも有効であると考えられる。

## 4. おわりに

今回の検証した鳥瞰映像システム及び俯瞰映像システムは、非熟練及び熟練の複数人のオペレータによる検証結果からも遠隔操縦操作の熟練度等の個人差はほとんどなく、汎用性の高さも実証されたため、いずれも実用レベルにあると考えられる。

鳥瞰映像システムについては、カメラの首振りやズーム機能等、作業への対応力が高く、画質も良いため、掘削・積み込み作業等のバケット・アーム・ブームを主として使用する作業に十分対応できるものと考えられる。

しかし、その機能を有効に発揮させるためには、カメラ機体の重量を考慮した取り付け用架台の製作が必要となり、設置手間や費用面での課題があるため、実用化へ向け今後のカメラの小型軽量化に期待したい。

俯瞰映像システムについては、鳥瞰映像システムに比べ、カメラ取付用架台の設置手間等を考えると簡便なことと、システムの価格も廉価なことから運用面では有効であり、今後の画質等の向上に期待したい。

今回、それぞれのシステムに組合せで使用したキャビン上部に設置した HD 車載カメラについては、前方の視認性やバケットの作業位置等作業が行う上で有効であると考えられるので、今後導入を検討していきたい。