

## 8. 重機遠隔操作における3Dスキャナーの活用

清水建設(株)土木技術本部

○藤吉 卓也

### 1. はじめに

自然災害の調査・復旧、特殊環境下での作業等、無人化施工はその適用範囲の拡大ならび高度化に向けて、さらなる技術開発が求められている。無人化施工では、遠隔操作に必要な画像伝送、無線通信、情報化施工において、建設業界がその多くを担っている。これらの技術においては、カメラやセンサー、無線通信設備等を活用して、作業装置の操作判断に必要な情報を取得し、オペレーターに提供することが重要である。

### 2. 本技術の概要

#### 2.1 開発の背景

無人化施工とは、災害復旧等の危険区域内での作業において、安全な場所からリモコンにより重機の遠隔操作を行うことにより、オペレーターの安全を確保しながら施工を行うものである。運転手はおもに作業重機に取り付けたカメラからの映像情報（写真-1）を頼りに周囲状況を把握し、作業対象の位置を判断する。しかし、通常のカメラ映像は平面的であり、作業重機に搭載したカメラから取得する映像だけでは、作業対象に対して奥行き方向の距離情報を把握することは困難である。よって奥行き情報を補完するカメラ映像が別途必要となり、従来は図-1に示すように作業用重機以外に、カメラ専用車両を別途操作し、他視点から映像を取得していた。しかし、カメラ専用車両の運用においては、いくつかの問題点がある。

##### ① コストアップ

直接実作業を行う重機以外に別途、作業に従事しないカメラ専用車両や、カメラ専用車両にも遠隔操作技術に長けた特別なオペレーターが必要であり、コストアップが必須となる。

##### ② 置位置の制約

カメラ専用車両自体の大きさにより、狭隘箇所では最適なアングル確保が困難である。

##### ③電波干渉

カメラ専用車両も無線での操作となるために回線数が倍増し、電波干渉の可能性が高くなる。

##### ④オペレーターのストレス

カメラ専用車両の操作者は重機操作者と異なるので、操作に必要な映像指示（視点変更操作）

のやり取りがうまくいかない場合がある。

解決の方策として、“奥行き情報をオペレーターに伝える”という、従来カメラ専用車両が担ってきた役割を、リアルタイム性に優れた3Dスキャナーで代替するシステムを提案し、開発を行った。



写真-1 重機搭載カメラからの映像

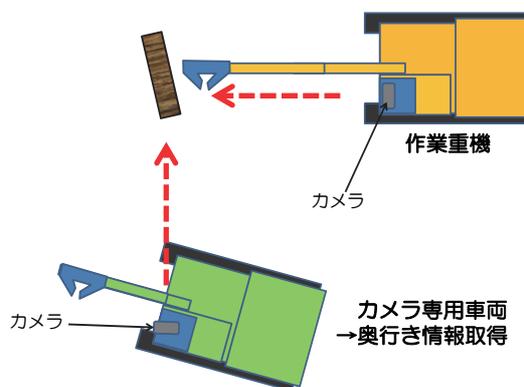


図-1 カメラ専用車両による奥行き情報取得

#### 2.2 技術の概要

建設業界での3Dスキャナーの活用方法は主に測量である。高精度の点群座標データを大量に取得できる反面、計測時間が長く、計測中は定置することが必要であった。しかし重機操作において必要な距離情報は、精度よりもリアルタイム性が重視される。そこで、一般的な3Dスキャナーの活用方法から発想の転換を行い、高い計測精度よ

り、リアルタイム性の高さを重視した。

調査・検討の結果、本システムの実証実験に用いる3DスキャナーはASUS社のXtion PRO LIVEを選定した。選定機種の特徴は、視認性に優れているという点である。計測範囲内の点群座標データ、RGB色情報を高速(最大60fps)で取得・映像化でき、その映像は鮮明である。

本システムの概要を以下に述べる。従来は、操作に関する映像情報の取得のために、作業用重機からの映像に加え、カメラ専用車両を別途配置していた。対して、本システムは作業重機に、3Dスキャナーを搭載し、重機搭載カメラ(通常運転手視点)の2次元映像と並行して、3Dスキャナーから3次元映像(写真-2)を取得するものである。ここで本稿での3次元映像とは、3次元画像化された点群座標データが、カメラ画像とほぼ同調し更新されていくことにより得られる映像とする。この3次元映像を用いて、カメラ専用車両が取得していた奥行き方向のカメラ映像を代替する。一方、カメラ映像は画像の鮮明さ、視界の広さ、リアルタイム性に優れており、周囲の状況把握や、奥行き情報を要しない大まかな操作に適している。そこで本システムでは、各々の優位性を組み合わせて、通常オペレーター視点のカメラ映像を用いて大半の操作を行うものとし、カメラ映像のみでは得られにくい奥行き方向の情報が必



写真-2 3Dスキャナーからの3次元映像

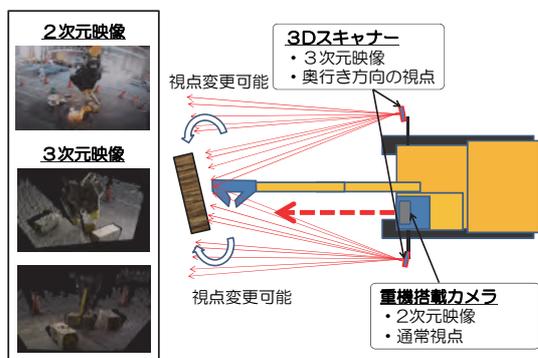


図-2 本システムにおける映像取得方式

要な操作は、3次元映像を用いて行うものとした(図-2)。3次元映像の特徴は、視点を変更することにより、重機操作には必要な奥行き情報を、あらゆる角度の視点から自由に取得できることである。本システムはこれらの特性を活かして、奥行き情報を取得するため配置していたカメラ専用車両を不要とした、無人化施工支援システムである。

### 3. システム実証実験報告

#### 3.1 実験概要

本システムの有用性の確認および課題抽出を行うため実証実験を行った。重機は無人化施工現場にて稼働しているものを用いた。また重機操作では解体重機運転に習熟したオペレーターに依頼し、遠隔操作に慣れてもらうための操作練習を1日実施したのち実験を開始した。

#### 3.2 実験設備

実験時の主な設備について解説する。実験時の操作全般において、オペレーターは直接重機が見えないという作業条件を設定した。遠隔操作席は、パーティションで3方を覆い、運転手は正面に設置したモニターに映し出される映像情報を頼りに、リモコンで重機の遠隔操作を行った。



図-3 従来システムの実験配置



写真-3 従来システムでの操作状況

(a)従来システムの構成

図-3 に実験時の従来システムを模擬した試験設備構成を示す。実験時は重機搭載カメラに加えて、奥行き方向の映像情報を得るため、通常カメラ専用車両が配置される位置に固定カメラを設置した。オペレーターは、これらのカメラから映し出される2つのモニター映像で状況を確認しながら操作を行った(写真-3)。

(b) 3D無人化施工支援システムの構成

実験時の本システムの設備構成を図-5 に示す。重機搭載カメラは、従来システムと同位置に配置し、機体の左右に1台ずつ、計2台の3Dスキャナーを搭載した。2台の3Dスキャナーから得られた3次元映像は、それぞれ遠隔操作席に設置したパソコン画面に出力するものとして(写真-4)、視点変更は2台が独立して操作可能なものとした。

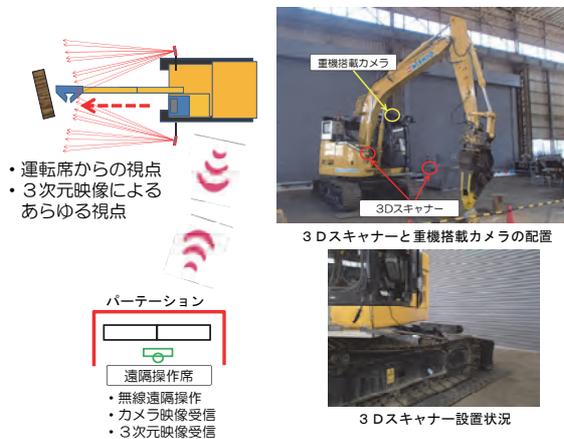


図-4 3D無人化施工支援システムの実験配置



写真-4 3次元映像出力状況

3.3 機能実証実験

(a) 3次元映像の特性確認

実験的に得られた点群座標データの計測誤差は、3m離れた対象物において30~40mm(約1%)程度であり、通常の重機操作に支障はないとしていた。しかし形状、大きさ、光の反射特性といった対象物の条件、また配置条件(傾き、重なり等)によって3次元映像の視認性に差がでることも想定していた。よって遠隔操作に対しての特性を予

め検証する必要があった。方法として様々な大きさ・形状の作業対象物に対して把持動作を行い、その基本データを取得した(写真-5)。



写真-5 特性確認試験状況

(b) 映像遅延時間の測定

3次元映像のリアルタイム性は、映像遅延時間がカメラ映像と同程度で、両映像がほぼ同調する程度とした。評価方法としてカメラ映像と3次元映像の実動作に対する映像遅延時間について測定を行った。

測定方法は、重機の実動作、重機搭載カメラ映像および3次元映像をビデオで同時撮影し、得られた映像から、実動作からの遅延時間を後日算出した(表-1)。

表-1 映像遅延時間測定結果

試験No	鉄骨カッター動作	重機動作に対する遅延時間(sec)	
		重機搭載カメラ	3Dスキャナー
1	閉じ始め	0.33	0.57
2	開き始め	0.47	0.77
3	閉じ始め	0.27	0.33
4	開き始め	0.40	0.43
5	閉じ始め	0.30	0.57
6	開き始め	0.43	0.27
7	閉じ始め	0.33	0.97
8	開き始め	0.40	0.93
9	閉じ始め	0.30	0.70
10	開き始め	0.50	0.47
11	閉じ始め	0.30	0.27
12	開き始め	0.50	1.03
13	閉じ始め	0.30	0.47
14	開き始め	0.50	1.10
15	閉じ始め	0.30	0.37
16	開き始め	0.30	0.70
17	閉じ始め	0.30	0.17
18	開き始め	0.37	0.33
19	閉じ始め	0.30	0.40
	平均遅延時間	0.36	0.57

(c)奥行き情報取得機能

3Dスキャナーによる3次元映像によって、従来のカメラ専用車両と同様に奥行き情報を取得できる機能が重要である。

機能確認の評価手法として、作業対象の正確な奥行き情報を必要とする角材を積み上げる作業

(写真-6)や、それらをベッセル内への投入する作業を行った。

結果、従来の無人化施工と同等の機能を有し、かつ特有の視点変更機能を活用することにより、上方視点からのベッセルへの投入位置確認といった、積み込み作業において有効な機能(図-5)を確認できた。

### 3.4 性能評価実験

性能(作業効率)について評価を行うため、図-6に示す作業A、B、Cについて所要時間を計測した。作業A、B、Cいずれにおいても、最も作業時間が短かったのは、本システムによるものであり、平均時間においても作業時間が短縮した。今回実験においては、従来方式に対して同等以上の性能が確認できた。



写真-6 ドラムに角材等を積上げる作業

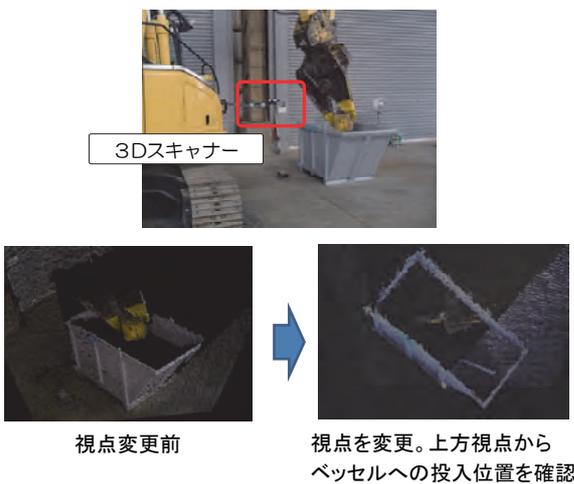


図-5 視点変更機能の活用



	作業順序	条件他
作業A	①尺角を把持 ②ベッセル内へ投入	・尺角一つに対して
作業B	①尺角を把持 ②ケーブルドラムに積上げ	・尺角一つに対して ・ケーブルドラム径550mm
作業C	①尺角を把持 ②ベッセル内へ投入	・尺角三つに対して ・三つの投入順序は任意

図-6 性能評価実験の作業内容

#### (5)今後の課題

実証実験を通じて3Dスキャナーを用いた本システムが無人化施工において有用であることを確認した。実用化に向けての今後の課題を3つ挙げる。

##### ① 3次元映像の高度化

システムの適用範囲を広げるために、さらに高精度で適用範囲の広い機器を用いた評価試験を行う。また、視認性を高めるためのソフト開発の方向性を検討する。

##### ② 無線通信設備の最適化

施工条件に応じた情報通信方式のカスタマイズや無線通信設備と情報処理機器の最適な構成を整理する。

##### ③ 耐久性の向上

防水・防塵、耐振動性といった、ハード面における耐久性の向上を図り、実用性を高める。

### 4. おわりに

無人化施工技術は災害対応だけでなく、老朽化が進行する社会インフラにおける点検作業においても実用性の高い応用技術としてのニーズが高まっている。本システムの実用化により、無人化施工の高度化とともに、建設業の抱えるさまざまな課題解決に貢献できるよう、今後とも取り組んでいきたいと考える。

#### 参考文献

- 1) 藤吉卓也：重機遠隔操作における3Dスキャナーの活用，建設機械施工，pp.53～58，2014.4