

3D スキャナーを用いた無人化施工支援システムの開発

清水建設株式会社 正会員 ○藤吉 卓也
清水建設株式会社 竹内 啓五

1. はじめに

自然災害の調査・復旧、福島県内高放射線量下での作業等、無人化施工はその適用範囲の拡大ならび高度化に向け、さらなる技術開発が求められている。無人化施工において、遠隔操作向け制御機器技術はメーカーが担っており、その一方で画像伝送、無線通信および情報化施工といった施工と密接に関係する技術分野では、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。本稿では、奥行き情報取得に用いていたカメラを、3Dスキャナーで代替した開発事例について報告する。

2. 本技術の概要

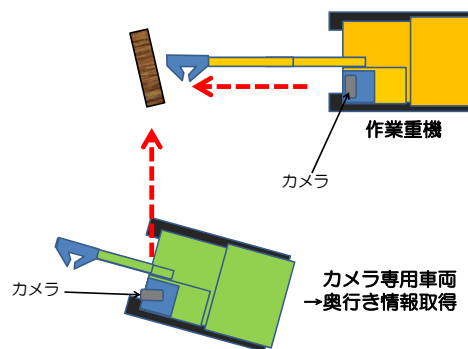
(1) 開発の背景

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。無人化施工では、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るため、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った。そのため、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、次に示す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が必要となる。加えて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る。
- ② 配置位置の制約：カメラ専用車両自体の大きさにより、狭隘箇所での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。



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

キーワード 無人化施工 奥行き情報 3Dスキャナー リアルタイム 視点変更

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1 清水建設（株）土木技術本部 技術開発部 TEL03-3561-3886

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。

(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、計測から画像出力までの時間の短さ、すなわちリアルタイム性の高さを重視した。

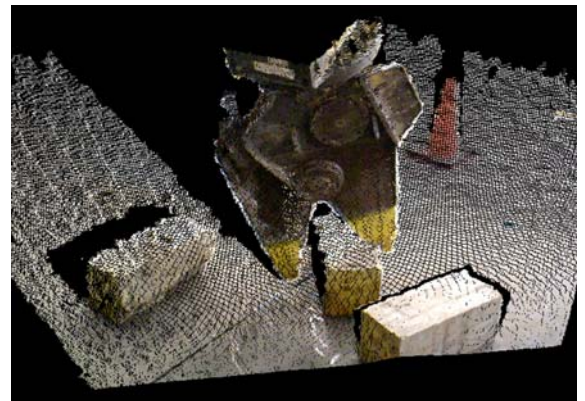
調査・検討の結果、本システムの実証実験に用いる3DスキャナーはASUS社のXtion PRO LIVEを選定した。選定機種の特徴は、3次元情報取得および画像出力における“速さ”である。計測範囲内の点群座標データ、RGB色情報を高速（最大60fps）で取得し、3次元映像をほぼリアルタイムにモニター上に表示することが可能である。

本システムの概要を以下に述べる。操作に関する映像情報の取得のために、従来は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（通常の運転手視点）の2次元映像に加えて、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。

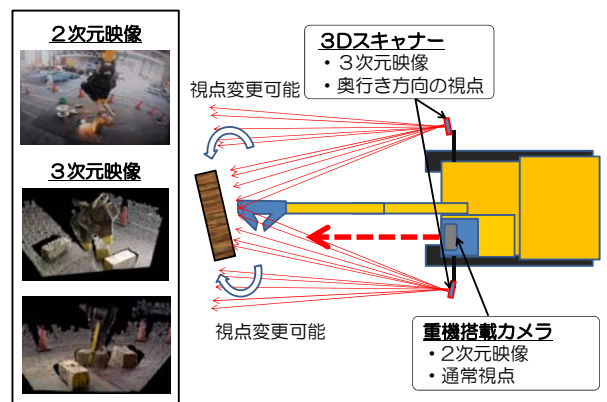
この映像情報を用いて、カメラ専用車両が取得していた奥行き方向のカメラ映像を代替する。また特筆すべきは、この3次元映像は、自由に視点を変更することにより、重機操作には必要な奥行き情報を、あらゆる角度の視点から取得できることである。

一方、カメラ映像は画像の鮮明さ、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、各々の優位性を活かして通常のア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要な操作は、3次元映像を用いて行うものとする（図—2）。

本システムは、この方式を用いることにより、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、新しい無人化施工の支援システムである。



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

3. システム実証実験

(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。重機操作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。

(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、パーテーションで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。

(a) 従来システムの構成

図一3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（写真一3）。



写真一3 従来システムでの操作状況



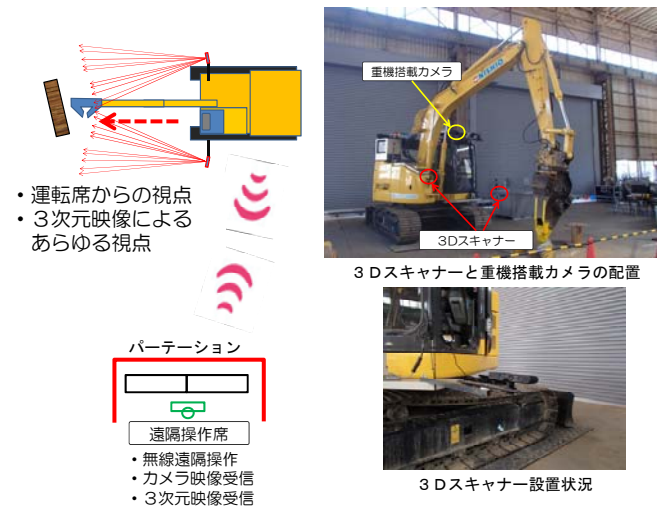
図一3 従来システムの実験配置

(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一4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（写真一4）、視点変更は2台が独立して操作可能なものとした。



写真一4 3次元映像出力状況



図一4 3D無人化施工支援システムの実験配置

(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データの計測距離における誤差は、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、と想定していた。

しかし実施工においては、作業対象物の形状、大きさ、反射特性および配置状況（傾き、重なり等）の相関、取得される点群座標データの視認性が重機遠隔操作に対しての有用性を検証する必要があった。このため様々な大きさ・形状の作業対象物



写真一5 特性確認実験状況

に対して把持動作等を行い（写真—５）基本データを取得した。

(b) 映像遅延時間の測定

3次元映像のリアルタイム性として求める機能は、映像遅延時間がカメラ映像と同程度で、両画像がほぼ同調しているものとした。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するものとした。測定結果を表—1に示す。3Dスキャナーからの出力映像は、カメラ映像に比べ若干の遅延は生じるが、平均遅延時間は約0.2秒程度であった。このときオペレーターからのヒアリング結果より、今回程度の映像遅延では遠隔操作にストレス感はない、という知見が得られた。

(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。

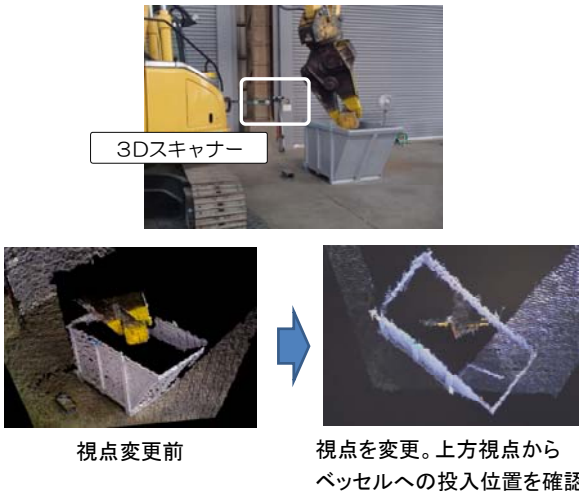
結果、従来の無人化施工と同等の機能を有し、かつ特有の視点変更機能を活用することにより、上方視点からのベッセルへの投入位置確認といった、積み込み作業において有効な機能（図—5）を確認できた。



写真—6 ドラムに角材等を積上げる作業

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



図—5 視点変更機能の活用

(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。



図—6 性能評価実験の作業内容

	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

(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 3D スキャナーの高性能化

システムの適用範囲を広げるために、さらに高精度で検出範囲の広い 3D スキャナーを用いた検証を行う。

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検討し、整理する。

③ 耐久性の向上

現場で試験施工を通じて、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る。

4. おわりに

3D スキャナーを活用した無人化施工における技術開発事例を報告した。これまで多くの現場で培われてきた無人化施工技術は従来の災害復旧だけでなく、インフラ維持管理分野においても、実用的かつ即効性の高い応用技術として活用が期待できる。本システムの実用化により無人化施工の高度化に寄与し、さらに建設業の課題を解決にむけた新たな足掛かりとなるべく取り組んでいきたいと考える。