

重機遠隔操作における 3D スキャナーの活用

3D 無人化施工支援システムの開発

藤 吉 卓 也

近年様々な分野で活用が図られている 3D スキャナーを, 無人化施工技術に応用した。本技術は, 3D スキャナーからの 3 次元映像をもとに, オペレーターに対象物への距離情報を, 正確かつリアルタイム伝達するものである。これにより従来の無人化施工でのカメラ専用車両を重機搭載の 3D スキャナーに代替し, コストダウンとともに施工精度の向上を図ることが可能となる。

無人化施工現場で稼働している重機を用いて実証実験を行い, 取得データからその有用性を確認した。本稿では技術概要と実証実験結果について報告する。

キーワード: 無人化施工, 遠隔操作, カメラ映像, 奥行き情報, 3D スキャナー, 3 次元映像, リアルタイム

1. はじめに

近年の異常気象による災害復旧作業の増加, 福島県内高放射線量下での作業等, 無人化施工のニーズの増加ならび高度化が求められている。

無人化施工においては, 遠隔操作向け油圧制御機器技術は重機メーカーが担っており, その一方で画像伝送技術, 無線通信技術, 情報化施工技術といった施工に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。これらの技術はカメラや無線通信設備, センサー等を活用することが重要であり, 近年の急速な電子機器の性能向上にともない, 無人化施工の技術も進歩している。

近年, 様々な業界で注目されている 3D スキャナーは, 物体の 3 次元位置情報を, 大量の“点群データ”として短時間で取得する機器である。取得されたデータは, パソコンを用いて高速演算処理することにより, 3 次元の映像データに変換することが可能である。今回, リアルタイム性に優れた 3D スキャナーを用いて, 「3D 無人化施工支援システム」(以下, 本システム)を開発し, 従来の無人化施工が抱える課題の解決を図った。本稿ではその技術概要から実証実験結果までを報告する。

2. 本技術の概要

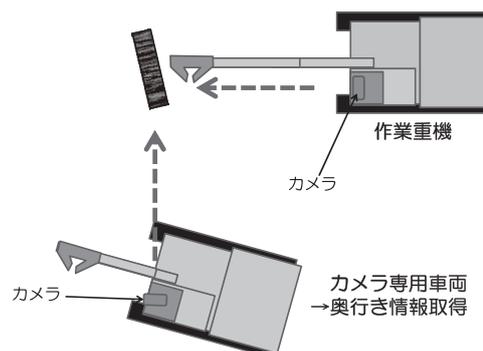
(1) 開発の背景

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。無人化施工においては, 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)をもとに周囲状況や作業対象の位置を把握する。しかし, 重機搭載カメラから取得



写真—1 重機搭載カメラの映像



図—1 カメラ専用車両による奥行き情報取得

する映像だけでは、作業対象への距離や奥行きを把握することが困難であるため、奥行き情報を補完するカメラ映像が別途必要となる。従来それら奥行き方向の映像は、図一1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課題がある。以下にその課題を述べる。

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は困難である。

③電波の干渉

カメラ専用車両も無線での操作となるために、無線回線数が倍増し、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

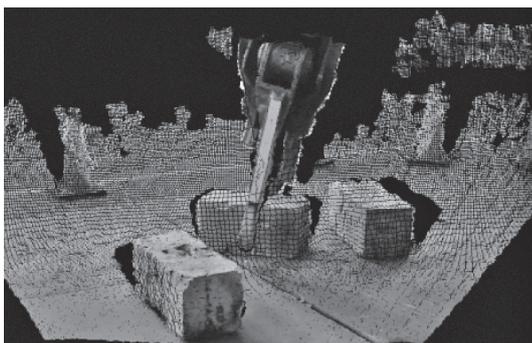
作業重機とカメラ専用車両の運転手が異なるために、重機操作に必要な映像のやり取りがうまくいかない場合がある。

これらの課題解決のために、“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、3D スキャナーを活用することにより、代替するシステムを提案し開発を行った。

(2) 技術の概要

本システムの概要を以下に述べる。前述のとおり、無人化施工における従来方式では、操作に関する映像情報の取得のために、作業用車両からの映像に加え、奥行き方向の情報を得るためにカメラ専用車両を別途適切な位置に配置していた。

これに対して、本システムは作業重機に、3D スキャナーを搭載し、重機搭載カメラから通常の運転手視点の2次元映像とは別途に、3D スキャナーから3次元



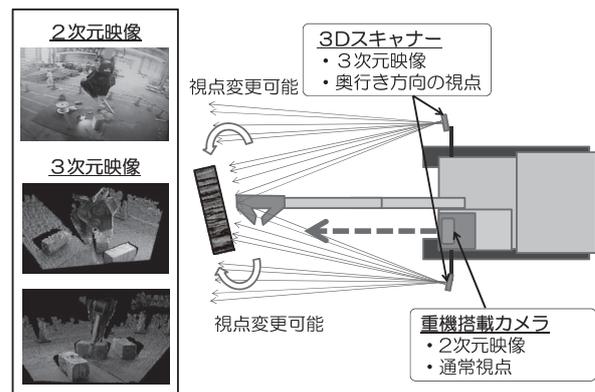
写真一2 3D スキャナーによる3次元映像

映像(写真一2)を取得し重機操作を行うものである。

ここでの3次元映像とは、3次元画像化された点群データが、カメラ画像とほぼ同調する速度で更新されていくことにより得られる映像を示す。この映像情報により、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ことを可能とする。

3次元映像は、自由に視点を変更することができるので、重機操作に必要な奥行き情報を、あらゆる角度の視点から取得することが可能である。

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いるので、直感的な操作に対しての情報取得に適している。よって本システムでは、大半の操作は運転席付近に設置した重機搭載カメラから得られる通常のオペレーター視点の映像情報をもとに行い、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を、3D スキャナーによる3次元映像を用いて行う(図一2)。



図一2 本システムにおける映像取得方式

本システムはこの映像取得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するものである(図一3)。

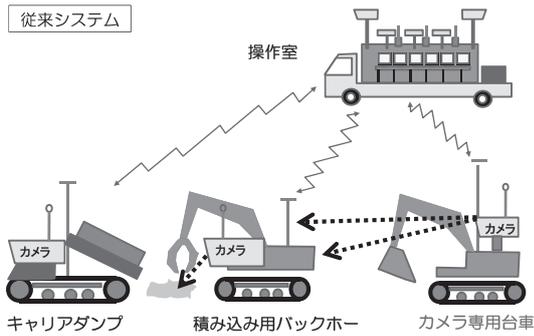
これにより、前述した無人化施工においてカメラ専用車両を導入した場合に生じる

- ①コストアップ
 - ②配置位置の制約
 - ③電波干渉
 - ④オペレーターのストレス
- という課題の解決を目的とする。

(3) 本システムの主要設備

(a) 3D スキャナー

建設業界で一般に活用されている3D スキャナーは、主に測量を目的としているために、非常に高精度の点群データを大量に取得できるが、計測時間が長く(図一4)、また測定中は定置することが必要であった。



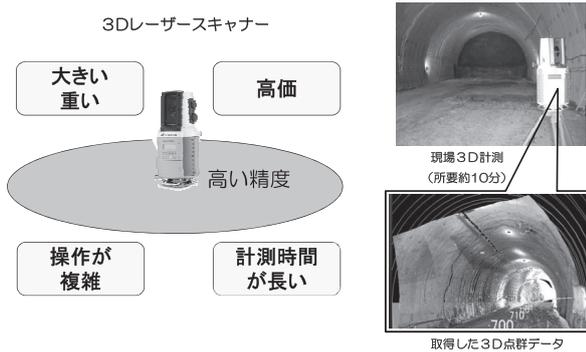
図一 本システムにおける無人化施工機械配置



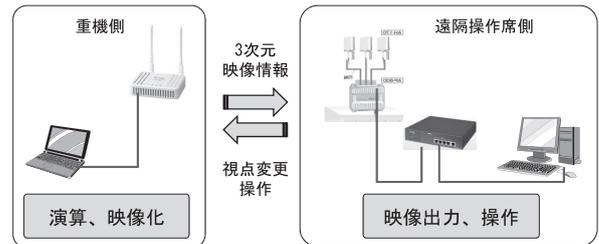
図一 5 本システムにおける 3D スキャナーの特徴

作, カメラ映像情報取得は無線通信を用いて行う。しかし 3D スキャナーにより取得される大量の座標データの無線通信は, 設備の通信速度により制約をうけるため, 映像出力のリアルタイム性が損なわれる。

この問題点解決のために, 本システムでは 3D スキャナーが取得した点群データは重機側に搭載したパソコンにより演算・映像化し, 無線 LAN によって映像データを遠隔操作席側に送信するものとした (図一 6)。



図一 4 高精度な 3D スキャナーの特徴



図一 6 本システムにおける無線通信設備の構成

3. システム実証実験

(1) 実験の概要

本システムの実用に向けて課題抽出および性能面での有用性の確認を行うため, 実証実験を行った。

無人化施工現場にて稼働している重機に 3D スキャナー及び付帯機器類を搭載して, 本システムを用いて重機の無線遠隔操作を行った。

各種要素実験を通じて, 実験データを取得すると共に本システムの機能確認を行い, 予め設定した作業の所要時間について従来システムと比較を行った。

(2) 実験設備

実験時に用いた主な設備について概説する。遠隔操作席においては, オペレーターは直接重機が見えないようパーティションで覆われた状態で, モニターに映し出される映像情報を頼りに遠隔操作を行った。

(a) 従来システムの構成

図一 7 に実験時の従来システムを模擬した試験設備

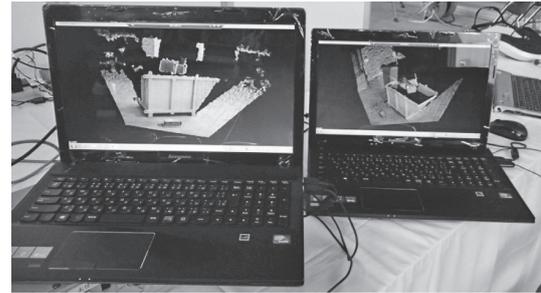
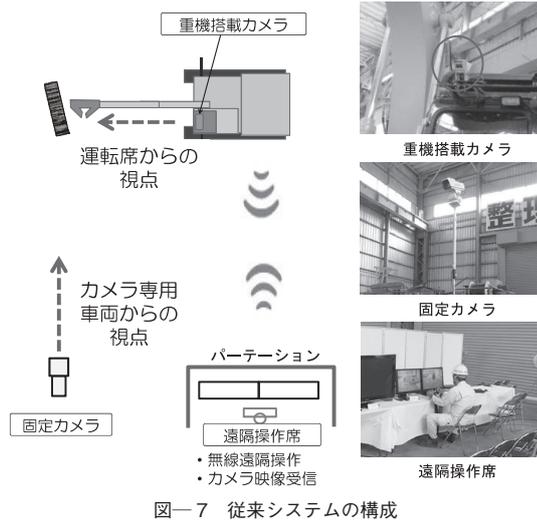
しかし重機操作において必要な奥行方向の情報を取得する場合は, 高精度のデータより若干精度は低くても, リアルタイムに欲しい情報が取得できることが重要である。そこで, 一般的な 3D スキャナーの活用方法から発想の転換を行い, 精度より, 計測時間が短くリアルタイムな画像化が可能であることを重視した。

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 を採用した (図一 5)。

採用機種の特徴は, 奥行き情報を持った映像情報取得の速さである。一般に点群と呼ばれる形状情報を RGB 色情報と共にリアルタイム (最大 60 fps) で取得可能であるため, 作業対象物および作業装置等を遅延なくモニター上に表示することが可能である。

(b) 無線通信設備

無人化施工においては, 一般的に作業車両の操



写真一四 3次元映像出力用パソコン

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2台の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。



写真一三 従来システムでの操作状況

(3) 機能実証実験

本システムの機能実証のために、重機の遠隔操作に対して有用な3次元映像情報についてのデータ取得を行った。

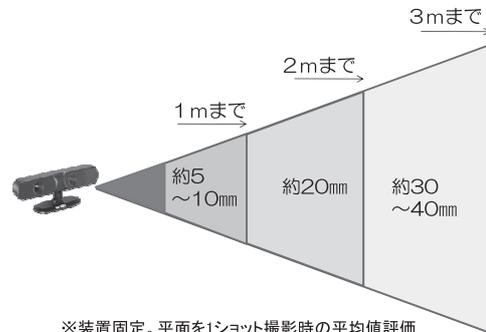
(a) 3次元映像の有用性

実験的に得られた点群データの計測距離の誤差は、3m離れた対象物において30~40mm(約1%)程度(図一9)であり、通常の重機操作に支障はないと想定していた。

構成を示す。実験時は重機搭載カメラに加えて、奥行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)。

(b) 本システムの構成

実験時の本システムの設備構成を図一8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、機体の左右に張り出す位置に1台ずつ、計2台の3D



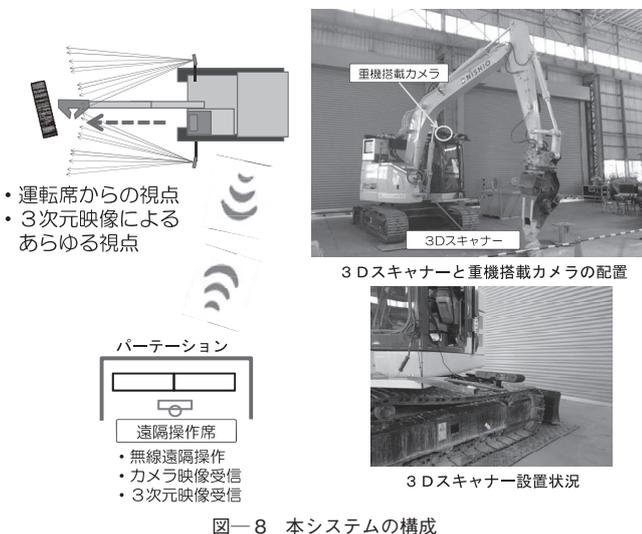
※装置固定。平面を1ショット撮影時の平均値評価
 ※観測対象の姿勢、形状により左右される可能性あり
 図一九 実験的に得られたXtionの精度

しかし実用化にむけては、作業対象物の姿勢、形状、大きさ等を含めた点群データの視認性との相関も合わせて重機操作に対しての有用性を実証する必要があった。このため様々な大きさ・形状の作業対象物に対して把持動作等を行い、その施工特性についての基本データを取得した(写真一5)。

(b) 映像遅延時間

オペレーターがストレスを感じないで操作を行うためには、カメラ映像および3次元映像の遅延が小さく、かつそれぞれが同調して出力されることが重要である。

遅延時間を測定するには、重機の動作、重機搭載カ





写真一5 多様な作業対象物を用いた機能確認

カメラ映像、3次元映像を一つの画面でビデオ撮影し、得られた鉄骨カッター開閉動作映像について、それぞれの画像の時間差を計測する手法を用いた(写真一6)。測定結果を表一1に示す。



写真一6 映像遅延時間測定状況

表一1 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

重機搭載カメラは、遅延時間が短く全体的に安定した計測値を示した。3D スキャナーの映像においては、カメラ映像に比べ若干の遅延は生じるが、カメラ映像に対しての平均遅延時間は約 0.2 秒程度であり、重機操作において、その時間差によるストレスは感じなかった。

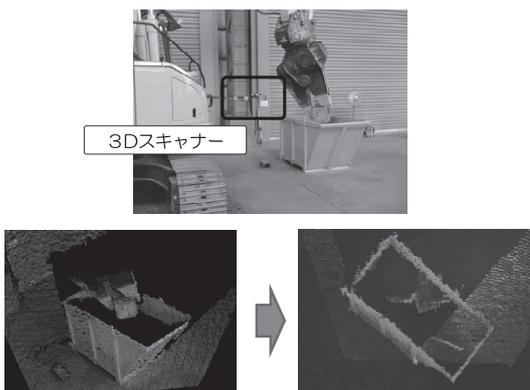
(c) 奥行情報取得機能

3D スキャナーによる3次元映像が奥行方向の情報取得に有効に機能することが重要である。3D スキャナーの配置について試行錯誤を行い、レーザーの照射範囲と反射強度の関係から、最適な位置を設定した。

機能確認の方法として、作業対象の正確な位置情報を必要とする角材等を積み上げる作業(写真一7)、上方からの視点の有効なベッセルへの投入作業(図一10)を行い、その有効性を確認した。



写真一7 ケーブルドラムに角材等を積み上げる作業



図一10 ベッセル投入時の視点変更

(4) 性能評価実験

(a) 実験方法

性能についての評価を行うために、予め設定した3つの作業(表一2)について、本システムと従来システムにおける所要時間の計測を行った。写真一8に実験時の設備配置を示す。

表一 性能評価実験で設定した作業内容

	内容	条件他
作業 A	尺角を把持→ベッセル投入	尺角一つ
作業 B	尺角を把持→ケーブルドラムに積上げ	尺角一つ、ドラム径 550 mm
作業 C	尺角を把持→ベッセル投入	尺角三つ、投入順序は自由



写真一八 性能評価実験設備配置

(b) 実験結果

本システムにおいては、作業 A, B, C について、5 回、従来システムにおいては、3 回作業を実施しその所要時間を計測した。計測結果を表一 3 に示す。

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の短縮が確認できた。

表一 3 性能評価実験時の作業時間計測結果

3D 無人化施工支援システム

	各作業ごとの所要時間		
	作業 A	作業 B	作業 C
1 回目	1 : 15	1 : 26	3 : 54
2 回目	1 : 30	1 : 25	3 : 14
3 回目	1 : 06	1 : 02	3 : 49
4 回目	1 : 21	1 : 30	2 : 59
5 回目	1 : 07	1 : 22	3 : 13
平均時間	1 : 15	1 : 21	3 : 25

従来システム

	各作業ごとの所要時間		
	作業 A	作業 B	作業 C
1 回目	1 : 26	1 : 25	3 : 55
2 回目	1 : 11	1 : 14	3 : 53
3 回目	1 : 30	2 : 39	3 : 14
平均時間	1 : 22	1 : 46	3 : 40

(4) 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が確認できた。

本システムをブラッシュアップするための課題とし



写真一九 稼働現場での試験実施状況

て以下に大きく 3 つ挙げる。

① 3D スキャナーの高性能化

より高性能な 3D スキャナーの採用により、画像の精度向上、検出範囲の拡大等を実現し、適用範囲を拡大する。

② 無線の通信速度・通信距離の向上

無線通信設備とパソコン等情報処理機器の組合せについて最適化を行い、3 次元映像情報の通信速度・通信距離をより向上する。

③ 耐久性向上

稼働現場で実施工を通じて、防水防塵を含めた機器全体の耐久性について見直しを図る。

すでに稼働中のトンネル現場においても、本システムを試験的に導入し(写真一 9) その適用性を確認した。また実施工時運用における、さらなる課題の抽出も合わせて実施している。

4. おわりに

無人化施工は、建設就業者の減少、技術者不足といった課題に対しての機械化・省力化技術として、老朽化したインフラのモニタリングといったニーズも高まってきた。

あらゆる分野の新技术を活用することにより、無人化施工特有のコストアップ、施工効率の低下という問題を解決し、より幅広いニーズに無人化施工が適用できるよう、今後とも取り組んでいきたいと考える。

JCMIA

【筆者紹介】

藤吉 卓也 (ふじよし たくや)
清水建設(株)
土木技術本部 機械技術部

