## 特集⋙ i-Construction, <u>CIM, ICT</u>

# 建機遠隔操作の高度化と建機自律制御の開発

## 青 木 浩 章・加 藤 崇・片 山 三 郎

災害復旧等で現場から離れた場所から建機を遠隔操作するには、車載映像や現場俯瞰映像を見ながら運転する必要がある。よって、運転手は映像情報だけを参考にして運転するため高度な運転技術を要し、実施できる運転手が年々減少しているため工法の適用が困難になろうとしている。こういった背景から、建機の遠隔操作支援を目的に開発した「ヘッドマウントディスプレイ(以下、HMD)を用いた臨場型映像システム」と、振動ローラに外付けロボット機構を装着して自動的に転圧走行作業を行う「自律制御型振動ローラ」について使用事例等を紹介する。

キーワード:遠隔操作、操作支援、HMD、自律制御、振動ローラ

#### 1. はじめに

建設機械を遠隔操作して災害復旧や酷所作業に適用 することは、作業従事者の安全確保のために必要との 認識が広まっており年々適用件数が増加している。こ ういった遠隔操作は、施工箇所から50m以上の直視 が難しい遠い場所から実施する事が多いため、運転手 は車載した運転手目線のカメラ映像や、現場を俯瞰で きる場所に設置した複数のカメラ映像を見ながら運転 している。この方法は、雲仙普賢岳で培われた現在の ところ最も実用的な方式であるが、複数のカメラ映像 を見ながら運転することは技術的に高度で、常時重機 運転に従事している運転手でも即座に対応できない場 合もある。また、近年では建設業の人手不足が進行し ており, 近い将来には高度な運転技術を持っている運 転手の確保が困難となり、遠隔操作が適用できないと いう事態が想定できる。もっと言えば、運転手の確保 自体が困難で、建機は有っても人が居ない事態も有り 得ると考えている。よって、遠隔操作を支援する技術 や、無人でも運転が可能な自動運転技術は重要である と考えている。

本稿では、筆者らが近年のICT技術を活用して開発した「即戦力型」と、「未来型」の二つの遠隔操作を支援する開発事例を紹介する。一つは、現行の遠隔操作の要である車載映像を高度化するシステムで、現行のシステムの一部を高度化するため、置換すれば即戦力型のシステムとして活用できる。もう一つが、高度な運転技術を持たなくても建機を自律制御して、熟

練者のような運転を自動で行うシステムの開発である。これは、建機そのものを高度化するため、現行システムを即座にこれに置換することは経済性や安全面等で課題があるが、未来に向けて必要な技術として現場で試用を開始している。

# 2. HMD を用いた臨場型遠隔映像システムの 開発

#### (1) 遠隔制御における映像情報システムの課題

二次災害のリスクが高い環境では、建設重機に搭乗して作業できないため、写真—1に示すように油圧ショベル等を遠隔操作用リモコンで操縦することが多い。重機を目視できる場合は直接現地の周囲状況を確認して作業できるが、目視できない場合は、現場が俯瞰できる場所に設置したカメラの映像と、作業機械上に搭載した(以下、車載)カメラの映像を見ながら運転する。災害直後では、現場を俯瞰する位置にカメラを設置すること自体が困難なケースが多いため、車載映像のみを参照して作業することも考えられる。





写真― 1 油圧ショベルと遠隔操作用リモコン

遠隔操作において車載映像は、振動等の影響を考慮して機械構造を持たない広角カメラをキャビン上に2台設置して、作業用の正面向け映像と移動用の足元向け映像を切替えながら使用することが多い。しかし、広角カメラを使っても写真—2に示す様に撮像範囲は限られており臨場感が無い。また、搭乗時には頭を傾ければ視認出来る範囲が視認できないので、写真—2でバケットがダンプに届いているかどうかを確認するには、一旦作業の手を緩めて車載映像から俯瞰映像に視線を移さざるを得ない。オペレーターの熟練度にもよるが、こういった確認動作の一つ一つが遠隔操作の作業効率を低下することになっているのが実状である。





写真-2 遠隔操作時の映像例(左:車載映像 右:俯瞰映像)

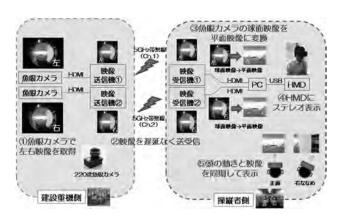
## (2) HMD を使った車載映像の高度化

現行の遠隔施工システムでは、操縦室に複数のモニターが写真—3のように配置される。オペレーターは、このモニターの中から必要な情報を得るために複数のモニターに視線を向けなくてはならない。また、カメラのアングルやズーム等を変更するために、オペレーターの指示に従ってカメラワークを専属で行う作業員が別途必要で、効率的な作業を行うためには、カメラワークを行う作業員にも相応に工事内容を理解させる必要がある。こういった問題を解決するため、近年ではコンピューターゲームや AV 機器等で一般に普及しつつある HMD を使って車載映像を高度化することを図—1のように考案した。

本仕様では、重機の操縦席に写真―4に示すよう



写直—3 遠隔操作室



図─1 システムブロック図



写真―4 ステレオ魚眼カメラ

に、機械構造を持たない台座に魚眼カメラを2個(左目用,右目用)搭載し、各カメラで取得した魚眼映像を無線により操縦室(オペレーター)に送る。その伝送された魚眼映像をPCで取り込み、球面映像から平面映像に変換する。HMDに投影する映像は、写真一5に示すHMDを装着した操縦者の頭の動きに同期しているため、HMDを装着した重機オペレーターが見たい方向に頭を動かすと、その方向のリアル映像を確認でき、あたかも重機に搭乗しているかのように作業を行うことができる。これにより専属のカメラワーク作業員なしで、現行の車載映像では撮像できなかった部分の映像情報をオペレーターに提供でき、遠隔操作を支援することができると考えた。



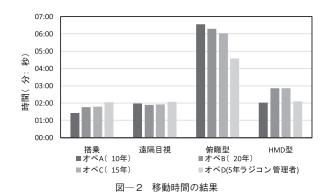
写真―5 HMD を用いた臨場型遠隔映像システム(プロトタイプ)

#### (3) 実験的検討

構築したプロトタイプを重機 (20 t 級油圧ショベル) に搭載して2つの作業を想定し、①搭乗、②遠隔目視、 ③俯瞰型, ④ HMD 型の4つの操作方法で,テスト フィールドにて実証した。

1つ目の実証作業は「移動」で、駐機場等の安全な エリアから遠隔操作が要求される作業エリアまでの移 動を想定した。移動テストコースは70mで、上記① ~④の条件にて経験年数の異なる4人のオペレーター の各5回の移動時間を計測した。その平均値を図-2 に、移動状況を写真—6に、HMDを用いて操縦して いる状況を写真―7にそれぞれ示す。結果的には, 通常作業である「搭乗」が最速であり、次に「遠隔目 視」であった。リモコン制御による操縦はオペDを 除いて慣れていないが、著しい作業効率の低下は確認 されなかった。一方「俯瞰型」は3台の俯瞰映像を用 い、映像のアングルを変更しながら操縦を行ったため 作業効率の低下が確認された。「搭乗」と比較すると 作業効率が低下し1/3程度となる結果が得られた。 「HMD型」は、「搭乗」「遠隔目視」には及ばないも のの、従来の「俯瞰型」と比較すると大幅に作業効率 が向上する結果を得た。

2つ目の実証作業は「掘削」で、掘削重量を検証し た結果を図一3に示す。掘削重量は、重機に搭載さ れている荷重計から求めて5回の平均値とした。オペ





写直-6 移動測定の状況



写直—7 HMD 型の操縦状況

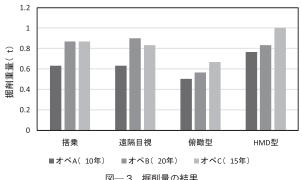


図-3 掘削量の結果

Aは、全体的に重量が少ない傾向となったが、同一 人物におけるそれは、「俯瞰型」が最も少ない結果と なり、他の条件ではほぼ同一となる結果が得られた。 なお、「俯瞰型」はバケットから地面までの距離感が 掴み難いことから、掘削するまでの時間が他の条件と は大きく異なる結果が得られた。よって、HMDを使っ た臨場型は俯瞰型に比べて搭乗作業に近い作業ができ ることが示されたと考えている(写真-8)。

### 3. 自律制御型振動ローラの開発

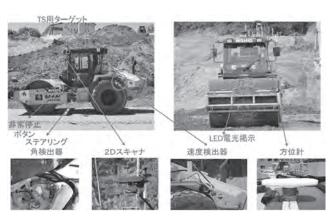
#### (1) 概要

ダムや土工事で行われる転圧作業を自動的に実施す るため、建設機械である振動ローラの自律制御化の開

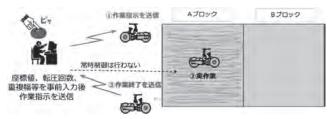


写真-8 掘削測定の状況

発をして施工現場に投入している。開発当初は、遠隔操作やダム工事をターゲットに開発してきたが、適用範囲を広げるため一般土工事へ導入するため技術を改良してきた。本章では開発した技術の概要と一般土工事での導入例を述べる。自律制御型振動ローラは、図一4に示す様に既存の振動ローラに、各種センサと自律制御アルゴリズムをインストールした制御PCを搭載することで転圧作業の自動化をおこなった。センサから得られる機械状態や周辺状況を制御PCで計算し、ハンドルや走行を制御するようになっている。また、操作としてオペレータは転圧する範囲の施工条件(四隅の座標値、重複幅、転圧回数等)を入力してスタートボタンを押す(図一5参照)。これにより自律制御による施工が開始する。



図─4 自律制御型振動ローラ搭載センサ



図一5 自動施工イメージ

#### (2) 一般土工事への適用

#### (a) 工事概要

工事件名:エコパークいずもざき

第3期最終処分場建設工事(図-6参照)

工事場所:新潟県三島郡出雲崎町稲川字池ノ尻地内

工 期:2016.4.26~2018.8.31

発注者名:(公財)新潟県環境保全事業団

工事内容: 敷地面積 5.3 ha, 容量約 93.7 万 m3

#### (b) 一般土工事と自律制御

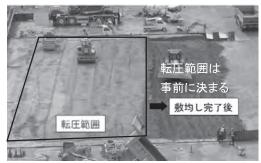
現状の振動ローラの自律制御技術は、**写真** 9の様にシステムに転圧範囲等の施工情報を事前に入力する必要がある。これは事前に決めた座標値を基準にし



図一6 現場概要



写真-9 施工範囲を設定する様子



図一7 ダム工事における振動ローラ

て制御させるためで、図―7に示すダム工事のコンクリート打設スケジュールのように予め範囲や転圧回数などが厳格に決められる工種において適用しやすい。しかし一般盛土工事のように当日の気候・地盤状況や材料性状等の様々な施工条件の中、盛土材受入斜路や導水勾配等を考慮し、他の重機と輻輳しながら、最適な施工範囲を現場で判断して施工が進められる自由度の高い工種においては適用し難い。この理由は、制御のための座標データがその場で変更されるため即座に再設定することが難しいからである。

#### (c) 一般土工適用に向け改良した点

従来は設計データや現場測量の座標値を数字でシステムに入力することで自動施工を開始する仕組みであったため、転圧範囲を変更する場合は再び、変更後の座標値をシステムに入力する必要があった。しかしながら座標値では現場のどこに該当するのか直感でわ



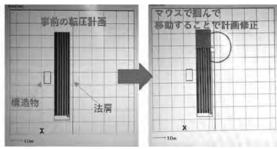


図-8 転圧範囲の変更(左:現場,右:操作画面)

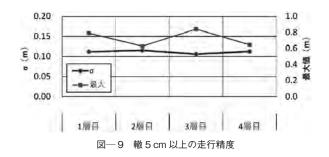
かり難いため、その場で転圧範囲変更をおこなう場合、変更箇所の座標値入力に戸惑う場合がある。この点を改良するため視覚的な操作にて転圧範囲が変更できるように改良した。基本操作は、図—8に示す様に図化された表示モニタ上の平面図をタッチ操作(マウス操作)で行なう。修正したい転圧範囲をタッチ操作で指定し、変更したい位置までドラッグすることで範囲が修正できる。またモニタ図上に構造物などのランドマークとなる設計データを入力しておけば、障害物や法肩の位置と転圧範囲の位置関係も視覚的に把握可能となり、走行不可箇所に対しての誤入力を防止できる。

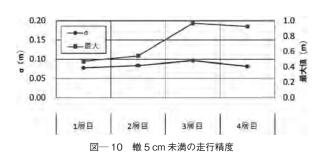
#### (d) 自律制御による施工結果

転圧対象の土砂は、付近の切土の残土を転用する形で運搬されたもの、あるいは外部搬入されたものであり状態は様々であった。土質や環境あるいは土砂の硬軟によって、転圧後の轍(車輪跡)が5cm以上と未満で、図一9、10のように走行精度がやや変化した。特に、轍が5cm以上の地盤では、地盤が不安定で転圧振動時に変形・沈下等が発生し、重機が一時的に極端に傾くことがあった。しかし、最大誤差は両者とも同程度になっていることから、土砂の硬軟は自動走行に大きな影響を与えないものと推測する。

## 4. おわりに

「HMDを用いた臨場型映像システム」は、建機を遠隔操作する上で現行の車載映像に無い「臨場感」を付加することができ、視線を移すことなく作業が可能で距離感も把握できるため、作業効率を大幅に向上できると考えている。今後は無人化施工だけでなく、ニューマチックケーソン工事の掘削作業ショベルのような一般的な工事現場においても実用し、画質の向上や遅延時間の短縮等を検討する予定である。一方、「自律制御型振動ローラ」は操作性を改善したことで、一般土工事に求められる柔軟な施工にも相応の精度にて対応することができたと考えているが、使いやすさと機能性向上については継続して実証する予定である。





#### 謝 辞

紹介した二つの技術開発と実証にあたり、多岐にわたりご指導とご協力を頂きました関係各位に厚く御礼を申し上げます。

J C M A



[筆者紹介] 青木 浩章 (あおき ひろあき) 大成建設㈱ 技術センター 先進技術開発部 建設技術開発室 メカトロニクスチーム チームリーダー



加藤 崇 (かとう たかし) 大成建設㈱ 技術センター 生産技術開発部 生産技術開発室 情報化チーム 課長



片山 三郎(かたやま さぶろう) 大成建設㈱ 技術センター 先進技術開発部 建設技術開発室 メカトロニクスチーム 課長代理