

10t 級クローラダンプを用いた自動走行システムの開発

大成建設(株)	正会員	○小森 聡	大成建設(株)	正会員	青木 浩章
大成建設(株)	正会員	若山 真則	大成建設(株)	正会員	片山 三郎
ソフトバンク(株)		進藤 秀樹	(株)諸岡		中島 真二

1. はじめに

我が国では少子高齢化が急激に進展してきており生産年齢人口の減少は避けられない。また屋外作業を主体とする建設業は3Kのイメージを払拭する努力はすすめられているが、若者離れは進行している。一般社団法人日本建設業連合会（日建連）によると、高年齢層の離職により、2025年には建設技能労働者が約125万人不足するため、生産性の向上と、女性や若者など新規入職者の確保が喫緊の課題となっている。

この様な中、国土交通省（国交省）が建設現場の生産性向上を目的として推進している i-Construction を受け、建設工事において近年自動化の取り組みが急速に活発化している。建設機械の自動化により省人化だけでなく、細かい機械操作が不要になるため働き方改革の一手として考えられているテレワークでの遠隔施工の実現も期待されている。そしてこの自動化・遠隔化において特に重要になる開発要素は以下の3項目である。

- 「自動制御アルゴリズム」
- 「現場状況をリアルに体感できるモニタリングシステム」
- 「遠隔操作を可能にする通信システム」

今回、土砂運搬機械であるクローラダンプ（図-1）に着目し自動走行システムを開発した。クローラダンプはトラフィカビリティの低い地盤で使用できるため、造成工事だけではなく、危険を伴う災害復旧の現場でも使用されまた、複数台導入されることが多い建設機械であるため自動化による開発効果が高い建設機械である。



図-1 10t 級クローラダンプ (MST2200)

本開発では、従来の遠隔操作方式では有人操作による走行の60%の能力が標準であったのに対して（参1）、有人操作と同等の8km/hを開発目標とした。

2. 開発概要

クローラダンプでの作業は図-2に示すように主に①土砂の積込、②運搬路の走行、③土砂の排土の3つに大別され、これらの作業を繰り返す。本開発は②の運搬路の走行に注目して開発を行った。

走行作業では、生産性を高めるのに必要になるのは走行速度を上げることである。また、クローラダンプでは通常走行距離が長く、高速走行になることが多く人や障害物などとの衝突のリスクも高くなるため、安全性の面でも高いレベルが要求される。そこで、本開発では、衝突による災害を排除するため、走行中の経路に障害物を認識した場合に回避するシステムの開発も行った。

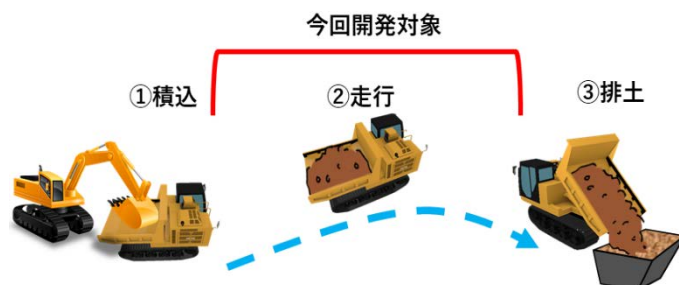


図-2 クローラダンプ主要作業

キーワード i-Construction, クローラダンプ, 人と同等の作業能力, 障害物回避

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1（新宿センタービル）

大成建設(株) 土木本部 機械部 TEL 03-5381-5309

3. 各システム概要

(1) 搭載システム

クローラダンプを自動走行させるアルゴリズム実現のために搭載したセンサ類のシステムを図-3 に示す. 自動走行は各種センサ情報から自己位置や障害物情報を取得して制御PC内で制御量を演算処理しておこなう. 主な搭載システムを下記に示す.

主な搭載システム

- ・ 重機の位置情報と方位情報 : GPS 方位計
- ・ 走行速度情報 : 回転計 (エンコーダ)
- ・ 障害物検出 : 3D-LiDAR
- ・ 重機の油圧制御 : テレコン
- ・ 自動制御演算 : 制御 PC
- ・ 映像 : 車載カメラ
- ・ 無線通信 : 5G 端末



図-3 自動ダンプ搭載システム

(2) 開発システム

a) 自動走行システム

本自動走行システムは図-4 に示すようにまず最初に有人で走行した軌跡を GPS で記録し,走行ルートを設定する.設定した走行ルートに任意の間隔で Way Point を設定し,その Way Point 上をトレースするように自動走行する.

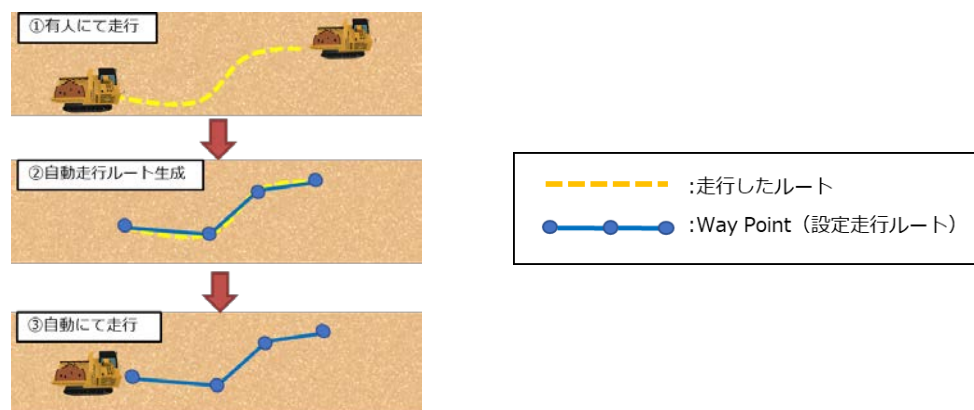


図-4 自動走行システム

b) ルート追従アルゴリズム

本自動走行システムのアルゴリズムではルート追従するために常に自機より少し先にある WayPoint を目標点として,そこに向かうために必要な速度,旋回量を演算し走行レバー制御をしている. 図-5 で示すようにクローラダンプが①を走行しているときには①の参照点を目指し,走行途中でクローラダンプが②へ到達したときには②の参照点に目標が変更される. ルート追従における各種パラメータは機体の車両特性や許容される走行誤差を考慮して調整した.

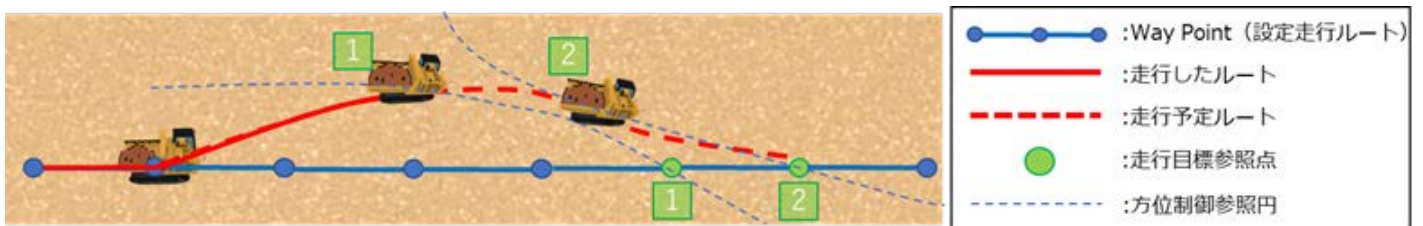


図-5 ルート追従アルゴリズム

c) 障害物回避アルゴリズム

本システムでは障害物との衝突防止のため、自動走行路中に障害物の有無を検知する機能を付加した。クローラダンプには3D-LiDARを搭載しており、自動走行中は常に周囲の状況をセンシングし障害物の有無をサーチしている。そして図-6のように障害物を検知後、回避可能なら回避ルートを自動生成し回避不可能と判断したら自動停止をするアルゴリズムとなっている。

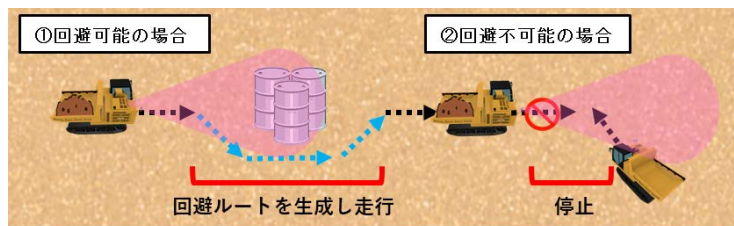


図-6 障害物回避アルゴリズム

4. 実証試験

(1) 自動走行試験

本自動走行システムの評価として走行速度および精度に関する検証と障害物回避に関する検証を行った。

a) 自動走行精度検証

自動走行システムの検証は3種類の実験コースを用意しそれぞれ3回走行しその時の走行誤差で評価した。コースについては基本性能を評価するためアップダウンの少ない平地で直線だけのコース、実施工に近いアップダウンを含むやや距離の長いコースを2種類用意した。図-7に実験ヤードを示す。走行速度についてはクローラダンプ1速時の最大速度8km/hを目標に走行させカーブ時は曲率半径に応じた速度に自動制御した。この速度は人が運転する速度と同等である。また走行コースの地盤は粘性土で雨天時には著しくトラフィカビリティが低下しホイールダンプでは走行が困難になる地盤である。

b) 精度検証結果

図-8に実験状況を、表-1に走行検証結果一覧を示す。

延長50m、勾配3.1度の地盤に直線コースを設け基本性能検証を実施した。3回走行検証を実施した結果、直進走行での横ブレ誤差は標準偏差で概ね0.17m、最大0.44mであった。状況観察では同一の履帯跡を繰り返し走行しているのでその精度の高さが見て取れた。

次に実践的な走行検証として、最大走行距離270m、最大勾配11.2度で10tの土砂を積込んだ実車と空荷の状態で検証した。結果、誤差は標準偏差で概ね0.2m、最大1.0m程度であった。実践的なコースにおいても基本性能と変わらない結果であった。また、実車と空車において走行精度に与える影響はほとんどなく、大きな差は認められなかった。

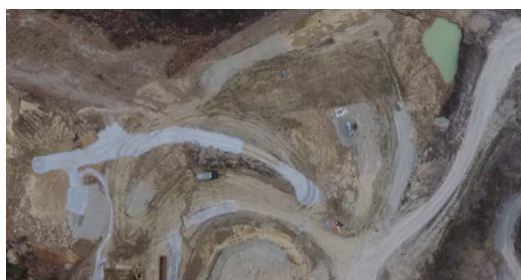


図-7 実験ヤード外観



図-8 自動走行実験状況

表-1 自動走行検証結果一覧

コース		直進	ショートコース (空荷状態)	ロングコース (実車状態)
コース形				
走行距離(m)		50	173	270
最小曲率半径(m)		-	7.1	11.2
最大斜度(度)		3.1	11.2	11.2
速度(km/h)	MAX	6.7	7.8	8.1
	AVE	4.9	5.7	5.9
走行誤差(m)	MAX	0.44	0.88	1.02
	σ	0.17	0.16	0.25

c) 障害物回避システム検証

図-9 に障害物回避状況を示す。各図の下部に障害物検知とそれに伴う走行ルートを可視化したものを示し、上部に実際の回避状況の写真を示す。最初設定する走行経路上にドラム缶を障害物として置いた。クローラダンプは搭載している 3D-LiDAR で自機の前方向路の状況を常時センシングしており地面より凸になっている箇所を障害物として検知する。障害物として検知したら車体幅や周辺状況を判断し左右のどちらに回避するべきか自動判定し回避可能な走行経路を新たに自動生成する。クローラダンプは新たに生成された走行経路上を選択して自動走行することで障害物を回避する。

d) クローラダンプ自動走行検証まとめ

今回開発した自動走行システムの特徴は有人オペレータが運転した場合と同じ 8km/h で自動走行を実用レベルでの精度で実現した点である。更に今回、長距離を自動走行した場合に安全面が課題であったが、障害物回避（図-9）が可能なことを示せたことは大きい。



図-9 障害物回避状況

(2) 仮想空間（VR）を利用した現場モニタリングシステムの実証

通常現場の監視には固定設置されたカメラや移動式のカメラ車を通して行うことが多い。この方法では、カメラは監視室のオペレータが操作して視点を変える必要があり現場全域と重機の位置関係を把握することが難しい。複数台設置したとしても、都度切り替える必要がある。死角も発生するため、先を読んだ運行管理が困難である。

そこで今回、オペレータに死角がなく好みの視点の映像を自由に選択し見ることができるシステムとするため VR 技術を活用した現場モニタリングシステムの開発をおこなった。本システムは、ヤード全体の VR 空間を作成し、その中にクローラダンプの 3D モデルを配置した。VR 空間上の地形面は UAV 測量によって得られた点群データを専用のソフトを使用して面化し作成した。3D モデルの位置は自動走行システムに搭載している GPS 情報とした。

このモニタリングシステムにより、クローラダンプを実験ヤード内で俯瞰的に監視することができた。（図-11）このシステムの特徴として、任意に視点を動かすことができるため、必要に応じて地上付近の視点（図-12）やオペレータ目線（図-13）で現場を把握することができる。これまで、カメラが設置できない場合や現場の状況変化によって死角となり、撮影することができなかった映像を得ることが可能になった。

また今後の展開として、自動化された重機はシステムエラー等により障害物との衝突や開口箇所に侵入などのリスクがある。このモニタリングシステムはオペレータ目線で現場を把握することができるので、危険な動きがあれば緊急停止が可能で未然にトラブルを防ぐことができる。更に、初見の現場においてもオペレータは事前にこの VR を使って操作シミュレーションすることで地形の状況を確認したり走行性の検証が可能となることが期待できる。



図-10 実験ヤードを走行するクローラダンプ
（航空映像写真）



図-11 VR 空間上を走行するクローラダンプモデル



図-12 地上付近角度の視点（VR 空間）

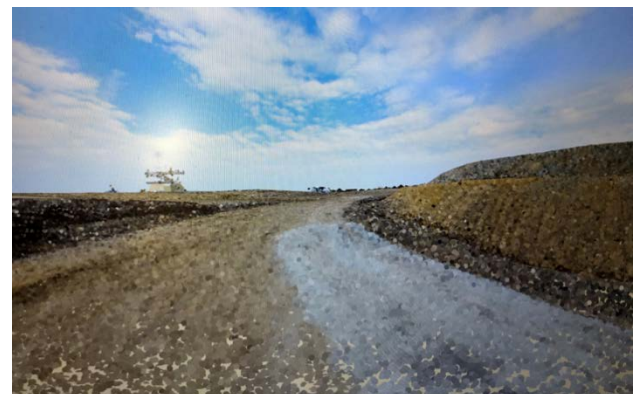


図-13 オペレータ目線からの視点（VR 空間）

(3) 5G 通信による遠距離オペレーション試験

今回クローラダンプの自動制御のための無線システムとして 5G 通信を適用した. 現場に構築した 5G 通信設備概要を図-14 に示す. 移動体であるクローラダンプに 5G 端末を設置し 5G 基地局(図-15)から伝送される 5G 電波を受信する. 5G 基地局からは光ケーブルにより既存のインターネット網に接続し現場操作室だけでなく神奈川県戸塚(現場から約 270km 地点)にある操作拠点で遠隔操作を可能にした. またインターネット区間の通信においては情報漏洩に対する安全性を高めるため VPN を構築しておこなった.

結果として以下のことが確認できた.

→5G は 4G と比べ遅延時間が 1/10 と大幅に短くすることが可能であること.

→神奈川県戸塚市(図-16)から三重県桑名市(図-17)の距離(約 270km)において自動運転のオペレーションが可能であること. この結果により, 全国の操作拠点での自動運転オペレーションが可能であると考えられる.

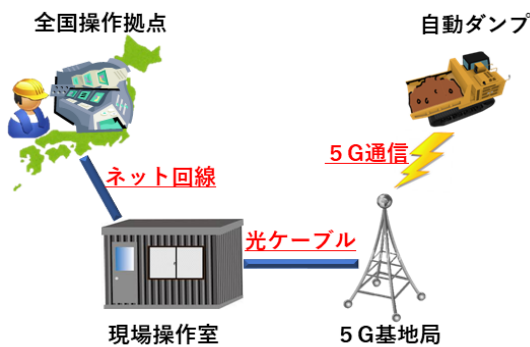


図-14 5G 通信全体図



図-15 5G 基地局 (三重県桑名)

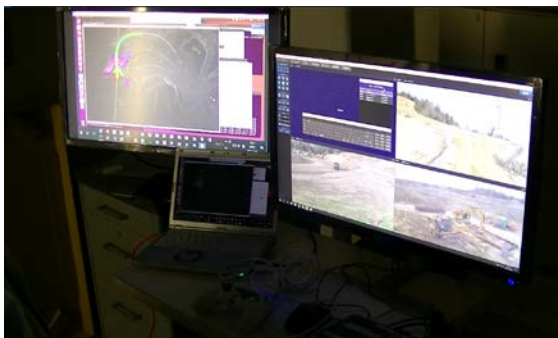


図-16 拠点操作室 (神奈川県戸塚)



図-17 操作室 (三重県桑名)

4. おわりに

今後, 生産年齢人口が減少する中, 今と同等レベルの質の高いインフラ構築を維持していくためには, 施工の効率化を図り生産性を高めていく一方で, 深刻な若者離れの進む建設業を魅力あるものにし, より多くの若者や女性が活躍できる産業に変えていくことは必要不可欠である. その問いに対する答えの一手として, 究極の将来像はテレワークと考える. テレワーク技術を活用することで直接, 現場へ行く移動時間などのロスを減ずることで, 優れた技術を持った職人が効率よく働き, 今より, 多くの現場に優れた技術による施工が実現する. また 3K 作業からの解放や, 遠隔施工という新たな施工の仕組みができることで, 新たな労働の形が作られ, 雇用のすそ野拡大にもつながると考えられる. 同様に医療の世界においても, 匠の技術をもつ医師が遠隔で高度な手術をして, 高度医療をより多くの人に提供する構想が打ち出されている. 建設現場では近い将来, 現場にある遠隔操作室での遠隔・自動化が増え, 更に先の未来では遠隔操作室自体も各施工会社の本社支店に集約・管理され, その中の一部がテレワークとして代行されていくべきと筆者は考えている. 本開発がその一助となれば幸いである.

参考文献

- (1) 建設無人化施工協会, 無人化施工の積算基準 (案), p4-7, Mar.2005.