

自動化リジッドダンプの開発及び自動走行能力の検証

大成建設株式会社 ○遠藤 亮雄, 青木 浩章
田村 道生, 後藤 洗一

1. はじめに

高齢化による生産労働人口の減少が社会問題となる中、建設業界においても3K(きつい, 汚い, 危険)に代表される負のイメージによる若者離れ、さらには近い将来に高齢者の大量離職が見込まれており、将来の担い手不足が深刻な問題となっている。これに対して国土交通省は建設業界のイメージ向上に向けて、新3K(給与, 休暇, 希望)の実現を目指している。新3Kの「希望」を実現する取組みとしてはICT技術の活用により生産性の向上を目指す「i-Construction」を提唱しており、データの利活用により建設現場をスマート化する技術が活発に開発されている。そうした技術の1つであるロボット技術を駆使した建設機械の自動化は、省人化による生産性の向上だけでなく、無人化による安全性の向上も期待できるため、多くの自動化建機が開発され、実際に施工現場で使用され始めている。

こうした中、筆者らは建設現場で多くの台数が稼働し、自動化によって高い効果が見込めると思われるダンプトラックに対して自動運転システムの開発を実施してきた。そしてその開発過程において、不整地運搬車である10t級クローラ式キャリアダンプの自動化を実現したり、今回はクローラダンプに比べて高速走行が可能な55t級リジッドフレーム式ダンプトラック(以下、リジッドダンプと称す)の自動化開発を行った。本稿では開発した自動運転システムの概要および能力検証結果について報告する。

2. 自動運転システムの概要

2.1 使用機械及び設置機器

今回自動化を行ったリジッドダンプの外観を図-1に示す。ベースマシンには小松製作所製HD465を使用し、電気仕掛けで動作が可能のように電制化改造を行った。主な改造箇所としてはステアリングの油圧を制御する電磁制御弁や車体情報を測定するための各種センサの増設を行った。また、自動運転モードとマニュアルモードに切替えるための切替スイッチを取付けており、マニュアルモードに切替えることで通常のダンプトラックと同等

に手動での操作が可能となっている。自動運転モードとマニュアルモードのどちらになっているかを判別するために、後方と前方の左右の3箇所に3色パトライトを設置した。自動運転モードの場合は黄色、マニュアルモードの場合は緑色、そして異常が発生した場合は赤色が点灯する。

さらに、周囲の状況を把握するためのLiDARセンサや車載カメラ、遠隔から車体へとアクセスするための無線機及び非常停止信号の受信機、自己位置を取得するためのRTK-GNSS方位計を設置した。設置場所を図-2に示す。



図-1 自動化リジッドダンプ及び改造箇所



図-2 機器設置状況

2.2 システム構成

図-3 に今回開発した自動運転システムの構成を示す。車載された制御 PC に自動運転のソフトウェアがインストールされており、リジッドダンプの動作はこの制御 PC からの指示によって行われる。制御 PC からの制御信号は I/O ボードを通して各種コントローラに伝達され、電磁制御弁を制御することでリジッドダンプが動作する。稼働時の車速や操舵角等の車両情報は各種センサにより測定され、同様に I/O ボードを通して制御 PC へと伝達される。位置情報を取得する GNSS や周囲の点群情報を取得する LiDAR センサは直接制御 PC へと繋がっている。車両情報を常時取得し、目標値に対する誤差に対してフィードバック制御を行うことで自動運転の制御を行っている。制御 PC へは無線ネットワークを用いて遠隔からアクセスすることができ、各種設定や自動運転開始・停止の指令を出すことができる。また、遠隔操作モードに切替えることで、コントローラを使って前進や後退等を行うこともできる。

2.3 自動運転の仕組み

土運搬作業は一般的に①積込機械への接近走行、②積込み待機、③土砂運搬、④排土場所への接近走

行、⑤排土動作、⑥積込み場への走行といったタスクに分けられる。本自動運転システムでは、これらのタスクの1つ1つをブロックで表現している。そして、図-4 に示すように自動運転の操作画面でそれぞれのタスクのブロックを積み重ねることで実施する作業シナリオを作成する仕組みとなっている。このとき、走行に関するブロックには、決まったルートを走行する「経路走行」と指定した座標へ経路を自動生成して低速で接近する「接近走行」の2種類とした。基本的には「経路走行」で土砂運搬を行い、積込位置や排土場所への接近は受取った積込機械や敷均し機械の位置情報へと経路を作成する「接近走行」を用いることで、作業の進捗に伴う積込・排土場所の変化に対応できるようにした。「経路走行」の走行経路や走行速度は事前に有人で走行して記録したデータを使用し、操作画面で選択すると地図上に走路が表示されて視覚的に確認することができる。また、「経路走行」は最高速度 30 km/h での走行が可能となっている。作成した作業シナリオを選択して自動運転を開始すると、上から順番にタスクが実行されて土運搬作業の一連動作が自動で実施される仕組みとなっている。

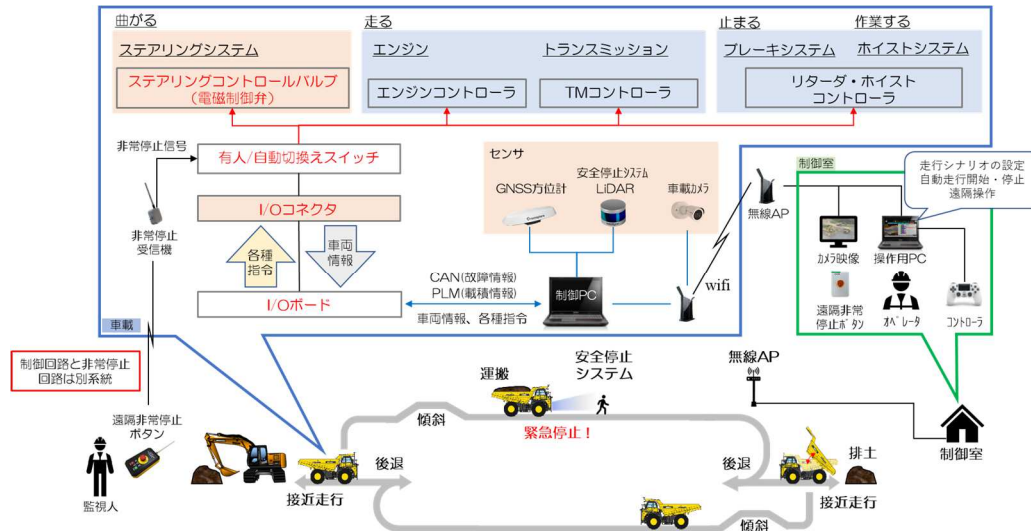


図-3 自動運転システム構成



図-4 操作画面

2.4 安全対策

安全に対する機能も実装した。1つは自動運転中に懸念される人や障害物への接触に対する安全機能である。検知システムの模式図を図-5に示す。前後に取付けられたLiDARセンサにより走行路上の障害物を検出し、設定されたエリア内と判定された場合に自動で減速・停止を行う機能となっている。減速エリアは走行速度で進行方向に対する距離を調整しており、高速での走行時にはより遠くから減速するように設定している。これにより、30 km/hでの走行時においても障害物に接触することなく停止することを確認している。自動走行停止後に障害物が撤去され、走行に支障が無い事が確認された場合は自動で運転が再開される。

もう1つは走行経路からの逸走に対する安全機能である。もとより走行経路から機体が逸走した際は自動で停止する機能が自動走行プログラムに組み込まれているが、万が一に暴走した場合の対策として遠隔非常停止装置も実装しており、携帯型の非常停止ボタンを押すことで強制的に走行を停止させることができる。この非常時の無線信号は自動運転の指令を送る信号とは異なる周波数帯を使用しており、UI(ユーザインターフェース)上から停止信号を送れない状況にも対応可能としている。さらに、非常停止装置の発信機と受信機は常に接続確認を行い、接続されていない場合は自動運転が停止する仕組みとすることで、無線が繋がらなくて非常停止することが出来ないといった事態を防げるようになっている。

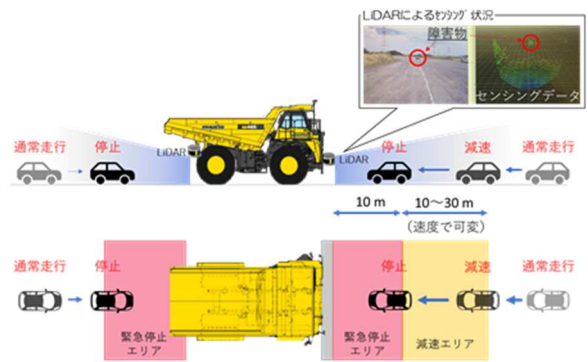


図-5 障害物検知システム

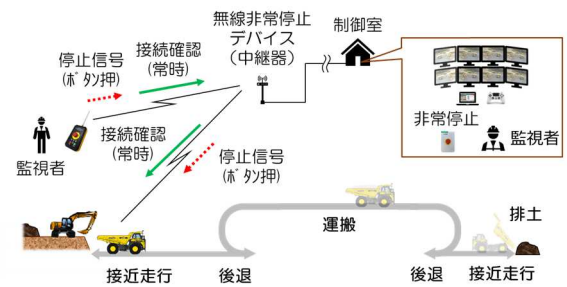


図-6 非常停止システム構成



(a) 往路経路(積荷有)



(b) 復路経路(積荷無)

図-7 走行精度検証実験コース

3. 自動運転システムの能力検証

開発した自動運転システムの能力検証として、走行精度及び作業サイクルタイムの確認を行った。検証場所は三重県桑名市にある実験場にて行い、いずれも気象条件は晴れの環境で実験を行った。

3.1 走行精度の確認

3.1.1 走行精度の計測

図-7に自動運転システムの走行精度検証を行った実験コースを示す。斜度13%を含む総延長が約1500mのコースとなっており、土運搬作業の1サイクルを模擬して積込場と排土場を配置している。機体の自動運転は予め有人走行で記録した経路に対して経路走行を行い、積込場・排土場への走行は自動で経路を生成する接近走行で行った。積込場から土砂を積込んだ状態で自動運転を開始し、排土場で排土した後に再び積込場へと戻ってくるまでの目標走行経路に対する走行誤差及び積込場や排土場への停止位置誤差を計測した。5回計測を実施した際の最大誤差及び走行誤差の標準偏差の算出を行った。図8に誤差の算出方法を示す。走行誤差は自己位置と近い目標経路2点との垂直距離、

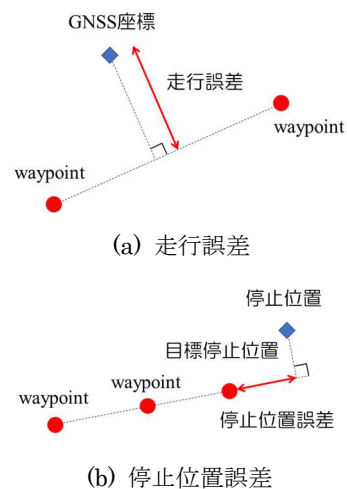


図-8 誤差算出方法

停止位置誤差は実際に停止した位置と目標停止位置との間の進行方向に対する距離とした。

3.1.2 走行誤差

表-1に積載有り/無し時の計測結果を示す。走行誤差及び停止位置誤差は、未積載時よりも土砂を積込んで走行した時の誤差が大きかった。また積載時の最大走行誤差は約1.67mであり、30km/hで直線走行した箇所が生じていた。さらに積載時の最大停止位置誤差は約0.37mで標準偏差は約0.28mであったことから、問題ない精度で自動運転走行が可能であることが確認できた。

3.2 作業効率の確認

3.2.1 サイクルタイムの測定及び走行経路

今回開発を行った自動運転システムの作業サイクルタイムと有人操作時との比較を行った。図-9に走行経路を示す。積込場所から走行を開始し、排土場所まで走行したところで排土動作を行う。その後、積込場所へと戻るまでの1サイクルを行うのに必要な作業時間の計測を行った。コースの総延長は約500mとなっている。

始めに走行経路や速度を記録させながら有人でコースを走行させた時のサイクルタイムの取得を行った。このとき、最高速度が30km/hを超えないように走行させている。その後、取得したデータから作業シナリオを作成して自動での走行を行った。積込場・排土場への走行は接近走行で行った。

3.2.2 サイクルタイムの比較

表-2に有人操作時及び自動運転時において、それぞれのタスクを実施するための経過時間を示す。経路走行に関しては有人操作の方が速く、有人操作に対して自動運転は往路で約97%、復路で約98%の効率であった。逆に接近走行は自動運転の方が速い結果となった。これは、有人操作の場合は物理的にシフトの切替えを行う必要があるのに対して、自動運転は瞬時に切替えが可能のため、動き出しまでの時間の差が原因であると考えられる。また、排土動作に要した時間は同等となっており、全体のサイクルタイムに関してもほとんど変わらない結果となった。今回開発した自動運転システムは有人操作と遜色のない動作が可能であると考えられる。

4. まとめ

55t級リジッドダンプを用いて自動で土運搬作業の一連動作を行うことができる自動運転システムを開発し、模擬の土運搬作業を想定した実験コースにて自動運転時の走行精度及び作業効率の検証を行った。その結果、問題ない精度で走行が可能であることが確認できた。速度30km/hでの自動走行においては一定の走行誤差はあるものの、運用上走路幅を考慮して走行計画を立てることで十

分実用に耐えうる精度であると考えている。また、作業効率に関しても有人操作時と遜色のない動作が可能であることが確認できた。

今後は自動化されたりリジッドダンプを複数台管理し、離合箇所では速度制限や停止させる等のシステム開発を考えている。その際にも、今回得られた走行誤差を基に減速度合いを決めるなど、施工効率をできる限り低下させないようなシステムを構築して現場適用を目指す。

参考文献

- 1) 片山三郎, 青木浩章, 若山真則: 10t級クローラダンプを用いた自動走行システムの開発, 土木学会第74回年次学術講演会, VI-354, 2019

表-1 走行誤差及び停止位置誤差

走行誤差 [m]				停止位置誤差 [m]	
積載有り		積載無し		積載有り	積載無し
最大値	標準偏差	最大値	標準偏差		
1.67	0.28	0.83	0.17	0.37	0.19



(a) 往路経路



(b) 復路経路

図-9 サイクルタイム計測コース

表-2 走行誤差及び停止位置誤差

	有人走行 [s]	自動走行 [s]
排土場へ経路走行	96	99
排土場へ接近走行	27	24
排土動作	28	28
積込場へ経路走行	97	99
積込場へ接近走行	19	16
サイクルタイム	267	266