

55 t 級リジッドダンプによる自動運転システム開発

青木 浩章・田村 道生・遠藤 亮雄

建設業界における人手不足を解消するための技術の1つとして、建設機械の自動化がある。これは省人化による生産性の向上だけではなく、無人化による労働環境の改善や安全性の向上も期待できる重要な技術であると考えている。そこで、1つの建設現場で複数台が稼働するダンプトラックに着目して、土運搬作業の一連動作を自動で行うシステムの開発を行った。本編では、開発した自動運転システムの概要及び実験フィールドにおいて実施した能力検証の結果について報告する。

キーワード：ダンプトラック、自動化、リジッドフレーム式、能力検証、高速走行

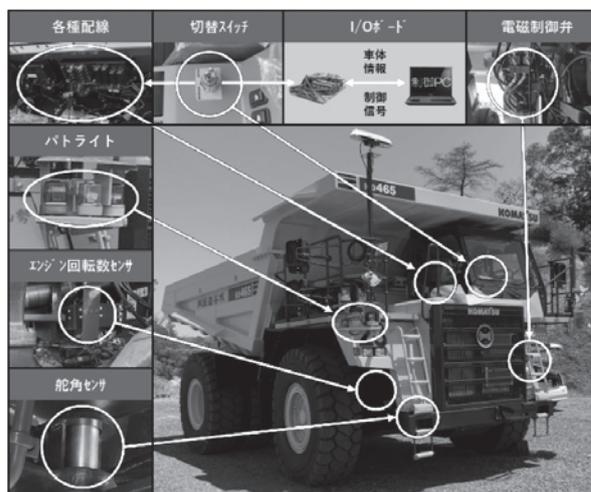
1. はじめに

生産労働人口の減少が社会問題となる中、建設業界では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により、他産業と比べて高齢化が進んでいる。さらに、近い将来には熟練高齢者の大量離職が見込まれるため、人手不足が深刻な問題となっている。そこで、国土交通省は2016年を生産性革命元年と位置付け、2025年までに建設現場の生産性を2割向上させることを目標とし、①ICTの全面的な活用（ICT土工）、②全体最適の導入（コンクリート工の規格の標準化等）、③施工時期の平準化をトプランナー施策とした「i-Construction」を推進している。さらに、2022年には「インフラ分野のDXアクションプラン」が策定され、i-Constructionの目的である建設現場の生産性の向上に加え、業務、組織、プロセス、文化、風土や働き方を変革を目的とした取組みを進めている。以上のことから、ICT技術を活用し、建設現場をよりスマート化するための開発が活発に行われている。その中でも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はなく、無人化による労働環境の改善や安全性の向上も期待できる重要な技術であると考えている。そこで、1つの建設現場で多くの台数が稼働するダンプトラックに着目して、土運搬作業の一連動作を自動で行うシステムの開発を行った。本編では、開発した自動運転システムの概要及び実験フィールドにおいて実施した走行精度や作業効率の検証結果について記載する。

2. 自動運転システムの概要

(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。ベースマシンである小松製作所製の55t積みリジッドフレーム式ダンプトラックHD465に対して電制化改造を行い、電気仕掛けでの動作を可能とした。主な改造箇所はステアリングの油圧を制御するための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である。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えスイッチを付与することで、マニュアルモード時には通常のダンプトラックと同等にオペレータが搭乗しての通常運転が可能となっている。外部からの自動運転モードとマニュアルモードの判別は、後方と前方の左右の3箇所に設置し



図—1 自動化リジッドダンプの外観

た3色パトライト灯により判別することができる。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、自己位置を認識するためのRTK-GNSS方位計、障害物を検知するLiDARセンサ、外部との通信や非常停止を行うための無線機、及び車載カメラを設置している。設置位置を図-2に示す。



図-2 周辺機器設置位置

(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、自動化ダンプトラックの動作はこの制御PCからの指示によって行われる。なお、自動運転のソフトウェアは自動自動車用のオープンソースである「Autoware」を活用している。制御PCからの制御信号は、I/Oボードによってそれぞれの信号を変換した後に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ダンプトラックが動作す

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RTK-GNSS方位計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、設定した走行経路からの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、操作画面上で遠隔操作モードに切替えると、コントローラを使った遠隔操作を行うこともできる。

(3) 安全対策

安全対策として、自動運転中に懸念される人や障害物への接触に対する機能を実装している。図-4に接触防止機能の模式図を示す。前後に設置したLiDARセンサにより周囲の状況を取得することで、走行経路上の障害物の有無を検出しており、障害物が設定されたエリア内で検出された場合に自動で減速・停止を行う機能となっている。エリアには減速エリアと停止エリアの2種類を設定しており、障害物の検出が減速エリア内の場合には10 km/hまで自動走行を減速させ、停止エリア内に入ると停止させる仕組みである。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させることができる。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。なお、後進は速度が遅いため、後方は停止エリアのみを設定している。自動走行停止後に

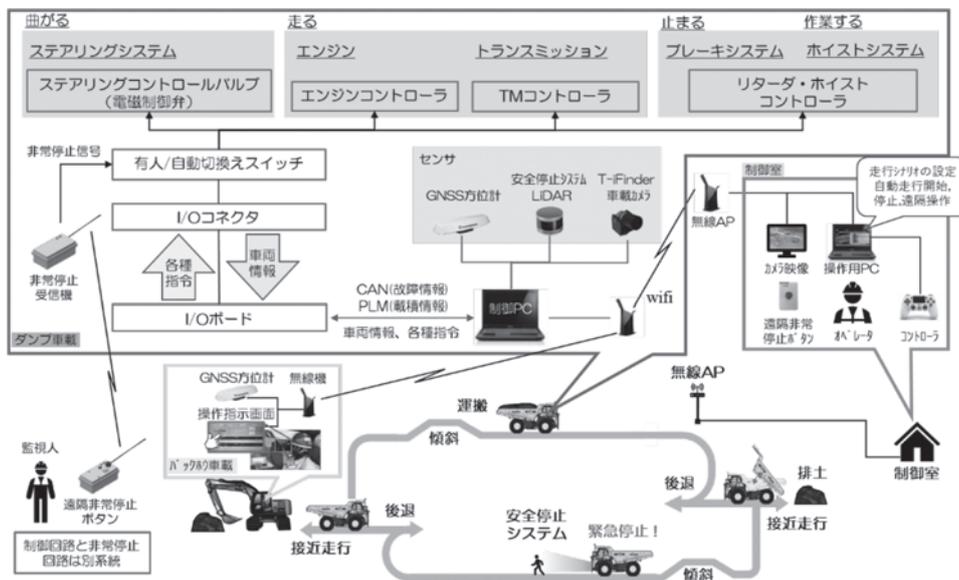
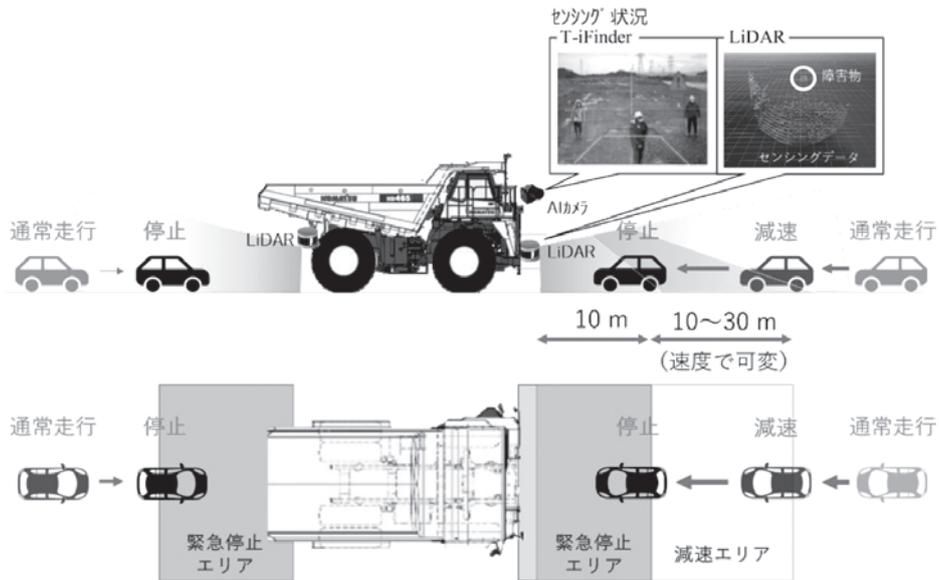


図-3 自動運転システムの構成



図一 自動運転システムの構成

障害物が移動または撤去され、エリア内に障害物が検出されなくなった場合は一定の間隔を置いて、自動運転が再開される。また、車載カメラ映像からAIを用いて人体検知を行うシステムである「T-iFinder」の併用も可能となっており、LiDAR センサによる障害物検知と同様に、設定したエリア内に人が検出された場合に自動運転を停止させることができる。

その他の安全対策として、走行経路からの逸走に対する安全機能がある。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非常停止装置が実装されており、遠隔から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、ユーザーインターフェース（以下、UI）上から停止信号を送れない状況でも対応が可能である。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、自動化ダンプトラックに停止信号が届かずに非常停止装置が作動しないといった事態を防げるようになっている。

(4) 作業シナリオの作成方法

土運搬作業は一般的に①積込機械への接近走行、②積込待機、③土砂運搬、④排土場所への接近走行、⑤排土動作、⑥積込場への走行といったタスクがあり、走行以外に実施すべき動作が存在する。さらに、実際の現場では積込場所や排土場所といった目標地点や走行経路、作業内容等が工事の進捗に伴い変化して

いくため、事前に計画した自動運転シナリオを日々更新する必要がある。そのため、本自動運転システムでは、できる限り簡易に自動運転の作業シナリオを作成するために、簡易プログラム「Blockly」を用いたUIを採用した。「Blockly」はビジュアルプログラミング言語で、定義されたブロックをパズルのように組み合わせることでプログラム（以下、作業シナリオ）を作れるため、専門的な知識が無くても操作が可能なツールとなっている。図一5に自動運転の実行画面を示す。本自動運転システムでは各タスクをブロックで表現し、UI上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の作成が可能となっている。

表一1にブロックの種類を示す。走行に関するブロックには、決まったルートを行く「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種類がある。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座標へと経路を自動作成する「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



図一5 自動運転操作画面

表一 1 ブロックの種類

ブロック名	ブロック	動作設定内容
合図		ホーンを鳴らす (1~3 回)
地点設定		地点マーカーの色, 地点番号 (地点1~5, 積込み位置, 排土位置も含む), 方位角 (ダンプトラックの向き)
イベント待ち		前の動作で停止し, 待ち解除ボタンを押すまで次の動作は実行されない
接近走行		自動生成された経路の色, 地点番号 (地点1~5, 積込み位置, 排土位置も含む), 進行方向 (前進or後退)
経路走行		経路の色と予め走行して記録した経路
排土動作		ダンプアップの分割回数
繰り返し		ブロックの繰り返し回数

た。「経路走行」の走行経路や走行速度は事前にオペレータが搭乗して手動操作で走行させ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」の最高速度は 30 km/h となっており, それ以上の速度で手動走行させても, 経路走行の速度データは 30 km/h で記録される。

走行以外の動作としては, ホーンを鳴らす「合図」やダンプアップ・ダウンを実施する「排土動作」がある。動作以外のブロックは, 主に接近走行で使用するための座標位置と方位角を指定する「地点設置」や自動運転の処理を一時停止させ, 解除するまで次の動作が実行されなくなる「イベント待ち」, 間に挟まれたブロックの動作を設定した回数繰り返すことができる「繰り返し」がある。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を自動で実施することができる。

(5) 積込システム

本自動運転システムはオペレータが搭乗した積込機械や敷均し機械との連携を考慮したシステムを実装している。図一6に積込機械に適用した場合のシステ

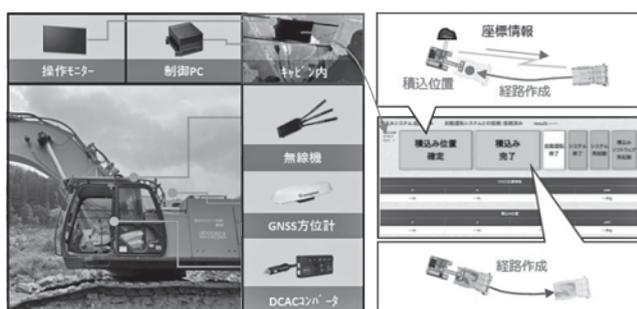
ム概要を示す。積込機械の位置座標及び方位を取得する RTK-GNSS 方位計と取得したデータを自動化ダンプトラックに送信する無線機, やり取りを行うためのシステムを搭載した車載 PC 及びタッチパネル式の操作モニターを通常の積込機械に後付けする形である。操作手順は以下の通りである。

- ①自動化ダンプトラックが経路走行により積込場まで自動走行を行い, 切返し地点で停車する。
- ②積込機械のオペレータは土砂をすくった後に, 自動化ダンプトラックを停止させたい方向に旋回させる。
- ③積込機械のオペレータはキャビン内に設置された操作画面の「積込位置確定」ボタンを押す。
- ④積込位置及び方位が自動化ダンプトラックに送られ, 接近走行のタスクにより走行経路が作成される。
- ⑤自動化ダンプトラックが作成された走行経路を自動走行し, 積込位置で停車する。
- ⑥積込機械のオペレータは自動化ダンプトラックに土砂を積み込み, 完了後に「積込完了」ボタンを押す。
- ⑦自動化ダンプトラックが排土場へ自動走行を開始する。

以上のように自動運転中のダンプトラックに対して, 積込作業における停止位置や積込開始・終了のタイミングを任意で指定することが可能である。また, 敷均し機械にこのシステムを取付けることで, 排土場においても同様に行うことができる。

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。



図一6 積込システム概要

(1) 走行精度の確認

図一七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 1,500 m のコースとなっている。土運搬作業の 1 サイクルを模擬して、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走行軌跡を取得した。そして、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。計測は 5 回行い、その際の最大誤差及び走行誤差の標準偏差の算出を行った。図一八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、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。

表一二に積載有り／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

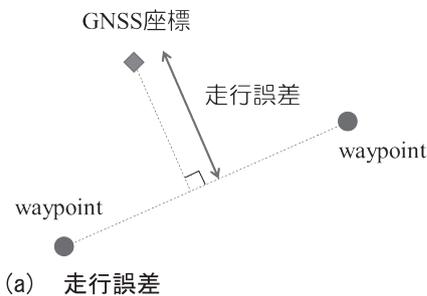


(a) 往路経路



(b) 復路経路

図一七 走行精度検証実験コース



(a) 走行誤差



(b) 停止位置誤差

図一八 誤差算出方法

最大走行誤差は約 1.67 m であり、30 km/h で直線走行した箇所で生じていた。さらに積載時の最大停止位置誤差は約 0.37 m で標準偏差は約 0.28 m であった。速度 30 km/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、走路幅を考慮して走行計画を立てることで十分に運用に耐えうる精度で自動走行が可能であることが確認できた。

(2) 作業効率の確認

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。図一九に走行経路を示す。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 500 m 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、それを有人操作時としてサイクルタイムの計測を行った。このとき、最高速度が 30 km/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成した作業シナリオで自動走行し、自動運転でのサイクルタイムの計測を行った。なお、積込場・排土場への走行は接近走行で行った。

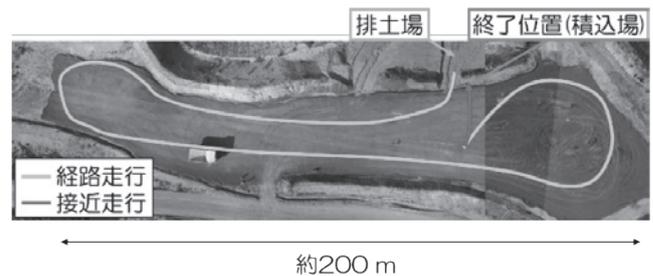
表一三に有人操作時及び自動運転時において、各

表一二 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

図一九 サイクルタイム計測コース

表一三 サイクルタイム計測結果

	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

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。接近走行に関して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で比較すると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. おわりに

55t級リジッドダンプに対して、土運搬作業を自動で実施可能な自動運転システムを開発し、走行精度及びサイクルタイムの検証を行った。その結果、有人操作と遜色ない動作が可能であり、経路幅を考慮して走行計画を立てることで問題なく運用が可能なシステムであることを確認できた。しかし、今回の検証は実験場でのものであり、実際の工事現場での運用では、シ

ステムの安定性や耐久性、現場環境へのロバスト性、運用における安全性が必須である考えられる。また、現状の自動化はリジッドダンプ単体であり、複数台での走行や他の重機と連携するためのシステムが必要となる。今後は現場での運用を通して、課題の抽出及び改善を実施して行くと共に、複数台を対象としたシステムを構築することで、生産性向上に貢献できるシステムを目指していく。

謝 辞

自動運転システムの技術開発にあたり、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。

JCMA

【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 生産技術開発部 スマート技術開発室
室長



田村 道生 (たむら みちお)

大成建設㈱
技術センター 生産技術開発部 スマート技術開発室
メカトロニクスチーム
チームリーダー



遠藤 亮雄 (えんどう あきお)

大成建設㈱
技術センター 生産技術開発部 スマート技術開発室
メカトロニクスチーム
課長代理

