

ICT を活用した建設機械の自動運転システムの開発と現場実証

安藤ハザマ	正会員	○武石	学
安藤ハザマ	正会員	千野	雅紀
安藤ハザマ	正会員	永井	裕之
安藤ハザマ	正会員	西尾	竜文

1. はじめに

建設業では就労者数の減少、高齢化が進んでおり、施工技術の継承や効率化に向けた対応が求められている。また、依然として多い労働災害を減少させるための対策も望まれている。当社はこれらの対応策として、ICTを活用した建設機械の自動運転システムの開発に取り組んでいる。建設現場での作業は、複数種の建設機械を使用して行う必要があり、これらが連携しながら自動運転で作業を進めることで生産性、安全性が向上すると考える。そこで、振動ローラとブルドーザの自動運転システムを開発し、振動ローラについては現場での実証実験を行った。本報告では、開発した自動運転システムの概要と精度検証、現場実証実験について述べる。

2. 振動ローラの自動運転システムの開発¹⁾

(1) システム概要

a) 開発対象

開発対象の振動ローラは、コンクリートダムの転圧作業で用いられる酒井重工業製の SD451 とした。

b) システム機器

外部環境の認識には、GNSS やコンパスなど各種センサを用いている（写真-1）。センサで取得した情報をリアルタイムに制御用 PC へ送信することで位置、方向などを把握している。

c) 運転方法

施工範囲を制御用 PC で設定することで、走行レーンおよびレーンチェンジの走行経路を最終レーンまで自動的に生成する。この経路に従って走行するように車体を制御して自動運転を行っている。施工範囲は 1 レーン目の始点と終点の 3 次元座標、施工幅を入力することで設定する（図-1）。また、振動の有無、転圧回数も施工条件として設定することができる。



写真-1 振動ローラと搭載機器

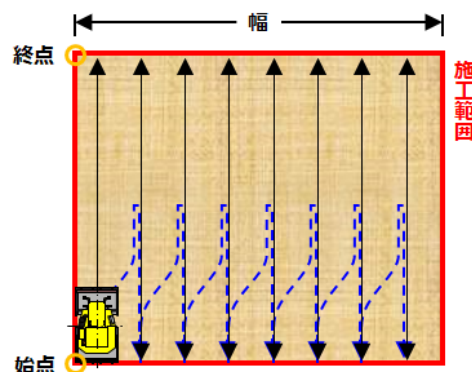


図-1 施工範囲の設定

(2) 実験方法

a) 実験条件

開発した自動運転システムの走行精度を確認するために実験を行った（写真-2）。実験は前後進走行とレーンチェンジ走行の 2 種類の走行を行い、設定された走行経路からのずれを測定することで走行精度を検証した。実験ヤードの大きさは、縦 30 m、幅 8 m であり、走行レーンの目安となるロープを設置した。



写真-2 自動運転の実験状況

キーワード 自動運転, 振動ローラ, ブルドーザ

連絡先 〒05-0822 茨城県つくば市荻間 515-1 安藤ハザマ技術研究所 TEL 029-858-8815

b) 前後進走行

30 m を前後進で往復した際の位置座標を GNSS で取得し、走行経路である直線と振動ローラのずれ量を計算で求めた。走行精度の比較のために、自動運転とオペレータ 3 名（ベテラン 1 名、初心者 2 名）による走行運転を行った。なお、ずれ量は絶対値を用いることで左右の区別をなくした。走行精度の評価指標として平均ずれ量、標準偏差、最大ずれ量を用いる。

c) レーンチェンジ

前後進走行と同様に走行中の座標を取得し、幅 2.1 m のレーンチェンジを行った際の、走行経路の曲線からのずれ量を算出する。レーンチェンジ走行では、正解となる走行経路との比較ができないため、オペレータによる精度検証は行っていない。

(3) 実験結果

前後進およびレーンチェンジ走行での精度実験の結果を表-1に示す。前後進走行における自動運転の平均ずれ量は68 mm、最大ずれ量は249 mmとなった。走行精度はベテランオペレータが一番良く、次に自動運転であった。初心者オペレータの走行精度は2名とも自動運転よりも悪い結果となった。図-2にこの結果を棒グラフで示す。

図-3にレーンチェンジ走行における走行経路と実際の走行軌跡の一例を示す。目標軌跡からのずれ量を低減するように修正を行い、走行経路に沿ってレーンチェンジの曲線を走行していることが分かる。

以上の結果から、自動運転の走行精度は初心者オペレータよりも良いことを確認した。実際の施工では、転圧を行うためのラップ幅を考慮して、前後進走行の走行精度は100 mm程度に収まることを目安としている。自動化振動ローラの平均誤差は68 mmであり、実施工に適用できる程度の走行精度を確保しているといえる。

表-1 精度確認結果

運転者	平均ずれ量 [m]	標準偏差 [m]	最大ずれ量 [m]
前後進走行			
自動運転	0.068	0.044	0.249
ベテランOP	0.046	0.026	0.129
初心者A	0.087	0.054	0.250
初心者B	0.093	0.081	0.441
レーンチェンジ走行			
自動運転	0.049	0.038	0.165

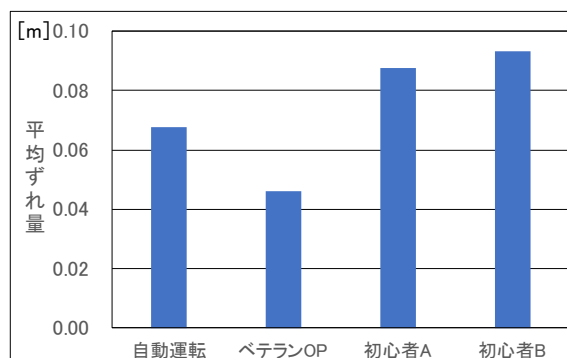


図-2 前後進走行精度結果

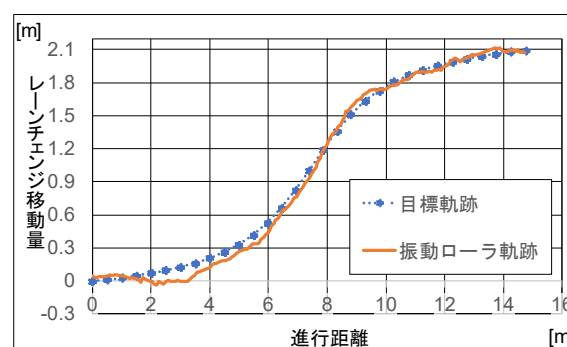


図-3 レーンチェンジ軌跡

3. ブルドーザの自動運転システムの開発²⁾

(1) システム概要

a) 開発対象

開発対象としたブルドーザは CAT 製の D6T とした。撒き出し動作を行うためのブレード操作は、ブルドーザにオプション搭載されている MC 機能を用いた。

b) システム機器

外部環境の認識には、GNSS やジャイロなど各種センサを用いている（写真-2）。センサ情報を制御用 PC にリアルタイムに送信することでブルドーザの位置、方向などを把握している。



写真-2 ブルドーザと搭載機器

c) 運転方法

施工範囲、撒き出し対象土砂の位置、押土方法を制御用 PC で設定することで、走行経路を自動的に生成する。施工範囲を超えない中で、生成した経路に従って走行するように車体を制御して自動運転を行っている。施工範囲は始点と終点の 3 次元座標、施工幅を入力することで設定する。土砂を降ろす位置は、基点となる 1 つ目の土砂位置を 3 次元座標で入力し、個々の土砂間隔を入力することで格子状に配列される。任意の土砂番号を指定することで自動運転が開始する（図-4）。

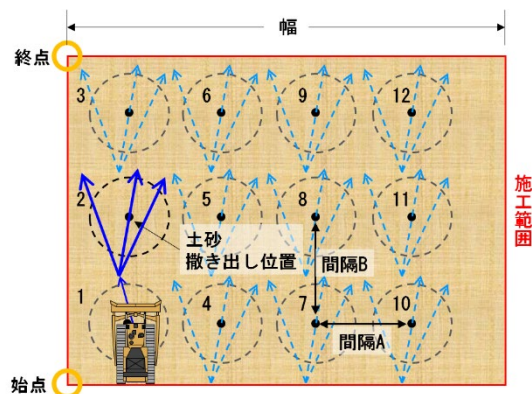


図-4 施工イメージ

(2) 実験方法

a) 実験内容

自動運転における走行精度と、撒き出した土砂の広がり形状を計測する実験を行った（写真-3）。

b) 走行実験

ブルドーザ転圧と撒き出し作業を想定し、土砂を押さない無負荷での走行と、土砂を押してブレードに負荷がある状態で土砂を乗り越える走行で実験を行った。15 m 程度走行する際の位置を GNSS で取得し、目標となる走行経路と実際にブルドーザが走行した軌跡のずれ量を計算で求めた。精度計算においては、ずれ量は絶対値を用いることで左右の区別をなくした。走行精度の評価指標として平均ずれ量、標準偏差、最大ずれ量を用いた。



写真-3 自動運転実験状況

c) 撒き出し実験

自動運転における押土方法を検証するために、撒き出した土砂の広がり形状を計測する実験を実施した。5 m³ および 12 m³ の土砂を異なる複数の押土方法で撒き出し、撒き出した土砂の形状を計測した。押土方法を変化させ、撒き出した土砂の形状に違いが生じるか比較することで、土砂の配置や走行経路の最適値を検証することを目的としている。

(3) 実験結果

走行実験の結果を表-2 に示す。ブルドーザ転圧の平均ずれ量は 88 mm、最大ずれ量は 373 mm であった。撒き出し作業では平均ずれ量は 119 mm、最大ずれ量は 530 mm であった。ブレードに負荷がある撒き出し作業の方が平均ずれ量も最大ずれ量も大きくなった。走行軌跡の一例を図-5 に示す。

ブルドーザ転圧では締固め管理のブロックサイズは 250 mm となっており³⁾、走行レーンごとの左右の誤差を加味すると、走行精度は 125 mm 以下である必要がある。開発した自動運転システムではブルドーザ転圧と撒き出し作業のいずれも 125 mm を下回っており、実施工を行うのにほぼ問題のない走行精度を有しているといえる。

撒き出し実験の計測結果の例を図-6 に示す。大別して 3 種類のパターンとなる押土方法で、角度や位置を変えて押土した。異なる押土パターンにおける撒き出し後の土砂形状を重ね合わせ、重複する部分の面積を算定し、それぞれのパターンで広がった撒き出し後の土砂の面積で除した値を重なり率と定義し、

表-2 走行精度確認結果

運転モード	平均ずれ量 [m]	標準偏差 [m]	最大ずれ量 [m]
ブルドーザ転圧	0.088	0.062	0.373
撒き出し作業	0.119	0.065	0.530

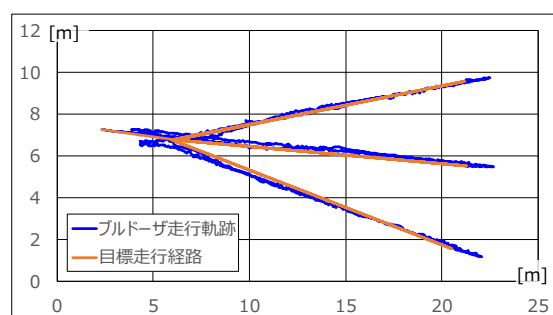


図-5 自動運転走行軌跡

評価指標とした。その結果、重なり率の平均値は 5 m^3 で75.1%， 12 m^3 では82.0%となった。押土方法によらず撒き出された土砂の形状は75%以上で一致しており、方法の違いによる土砂の広がり方への影響は小さいと考えられる。これは今回の実験においては、撒き出し後の土砂形状は押土方法の違いよりも土砂の性状や山積み形状による部分が影響したためと考えられるが、違いによる影響がどの程度かは、別途確認する必要がある。

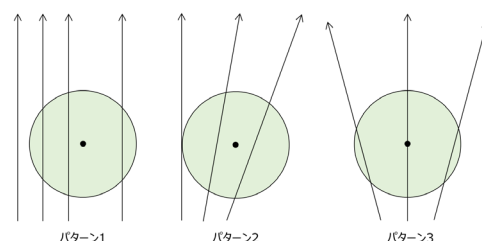
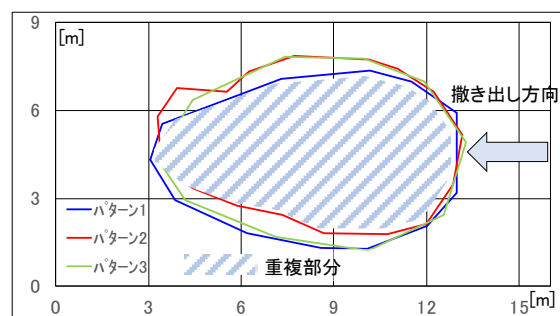


図-6 撒き出し土砂形状

4. 現場実証

(1) 実証概要

開発した自動運転システムが現場で問題なく使用できる安定性、精度を有していることを確認するため現場実証実験を行った（写真-4）。実験は振動ローラの自動運転システムを用いて、九州の造成現場で実施した。実証内容としては、転圧作業の実施工を自動運転で行い、システムの安定性と直進走行の精度を検証した。

(2) 実験結果

施工中は通信、自動運転のシステムも安定して動作しており、運用上の問題は生じなかった。施工範囲を3次元座標で設定することで、走行ルートの自動生成、指定回数での転圧作業が問題なく行えることを確認した。走行精度は、平均ずれ量で 122 mm と以前に実施した施工精度の実験と比べて低下しているが、実施工ではほぼ問題ない精度であることを確認した。以前に実施した施工精度の実験では、走行路盤が比較的締まっていたが、実施工では撒き出し後の締まっていない路盤を走行することから、路盤状態の違いにより、振動ローラは走行中に様々な方向に傾斜する。GNSSコンパスはキャビン屋根上にあるため、傾斜の影響から実際とは異なる車両位置を示して走行精度に影響を与えたと考えられる。この傾斜に応じた車両位置の補正を行うことで、走行精度は向上すると考えている。



写真-4 自動運転による施工状況

5. まとめ

振動ローラとブルドーザの自動運転システムを開発し、走行精度および撒き出し土砂形状に関する実証実験を行い、実用レベル上ほぼ問題のない走行精度を有していることが確認できた。また、撒き出し方法については、押し出す方向などを変化させても撒き出し形状にはあまり影響がないことを確認した。現在は建設機械ごとの単体の自動運転システムであるため、今後は複数種類の自動化建機の連携技術について開発を行っていく。また、新しい品質管理手法と組み合わせたシステム開発にも取り組んでおり、生産性と品質の向上を目指す。

参考文献

- 1) 千野雅紀，武石学：振動ローラの自動運転システムに関する実験報告，土木学会第73回年次学術講演会講演集，VI-701. 2018.
- 2) 千野雅紀，武石学：ブルドーザの自動運転システムに関する撒き出し実験報告，土木学会第74回年次学術講演会講演集，VI-357. 2019.
- 3) 国土交通省：TS・GNSSを用いた盛土の締固め管理要領，pp.22-24. 2019.