

7. 振動ローラの自律転圧走行の実証

次世代無人化施工システムの開発

大成建設株式会社技術センター 宮崎 裕道
〇青木 浩章
片山 三郎

1. はじめに

無人化施工は、雲仙普賢岳(長崎県)や有珠山(北海道)といった火山関連の災害復旧や、全国各地の台風・豪雨後の土砂災害復旧工事等の自然災害復旧等に適用されている。

弊社では、90年代中盤より前記の雲仙普賢岳や有珠山等で無人化施工を行っており、施工面はもちろん、技術面・経済面・安全面等の様々な場面を経験しているが、この無人化施工技術が災害復旧等に対して盤石な技術と言い切れるかというところに疑問を持っている。例えば、東日本大震災によって被災した東京電力(株)福島第一原子力発電所にも一番早く着手させて頂いたが、無人化施工技術が100%目的を果たしたかという(自然災害と原子力災害では同じレベルでないのは差し引いても)、被災から三年以上経過した今の原子力発電所の状況を見ても、決してそうではないと言わざるを得ない。

また、雲仙普賢岳等では所期の目的を果たしているが、将来(次世代)に向けて更なる劣悪環境に対応する無人化施工技術が必要であるという思いから、国土交通省の建設技術研究開発助成制度を活用し、「次世代無人化施工システムの開発」を課題に、社会へ有効に還元される事を目標に取り組んでいる。

2. 研究の背景

2.1 無人化施工の概要

無人化施工は、ラジコンで建設機械を操作する無線操縦システムと、オペレータが建設機械を操作して作業するのに必要な現場周辺の画像を伝送する画像伝送システムの2つを組み合わせ、安全な場所から建設機械を遠隔操作して作業を行うことである(図-1)。1994年の雲仙普賢岳の噴火災害復旧工事では、どちらのシステムも確立された技術ではなかったため、雲仙普賢岳の復旧と共に様々な技術を考案し、問題を解決しながら、無人化施工技術として確立してきた¹⁾。



図-1 無人化施工のイメージ

2.2 現在の無人化施工の問題点と自律型制御

現在の無人化施工は、現場から送られてくる建設機械の作業状況の映像を複数のモニタ画面を見ながら遠隔操作を行うため、オペレータは作業箇所周囲の状況を直接五感で感じながら操作する事が出来ない。したがって、有人施工とは違った運転技術が必要となり、オペレータの技量によって作業の出来が大きく異なることもあるため、緊急な現場や複雑な操作を必要とする状況下では対応力に懸念がある。また、複数の画像取得のための装置と通信環境が必要といった点も無人化施工適用の障害となっている。さらに、こういった技術を継承する現場自体も少ないのが現状で、このままでは今後の自然災害等の対応を、無人化施工にて対応する事が厳しくなると目される(図-2)。

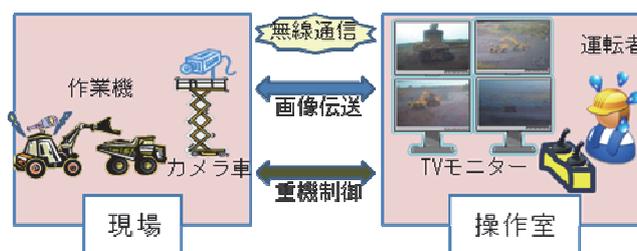


図-2 従来型無人化施工(モニター方式)

そこで、前述の問題を解決するために、作業機械に人間の五感に代わるセンサ類を搭載し、作業

開始命令を与えれば自ら判断して作業を行う「自律制御技術」を適用した次世代型の無人化施工システムの開発を行った（図-3）。

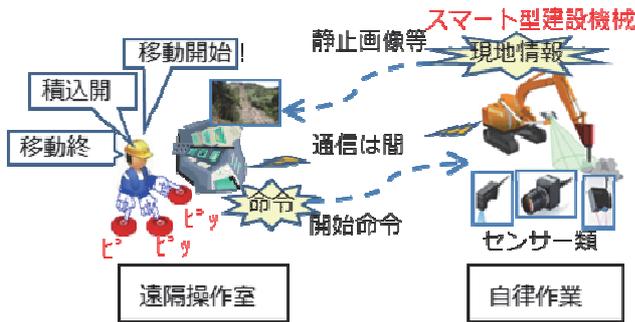


図-3 次世代型無人化施工

これにより、機械が自ら判断して作業を行うため常時操作が不要となり、オペレータの技量に大きく依存することなく操作が可能となる。また、多角的な映像が不要となりカメラ車といった支援機器が削減されるため、通信量も削減できる。本編は、平成25年度に実証した振動ローラの自律走行について述べるものである。

3. 振動ローラの構造と走行アルゴリズム

3.1 構造上の特徴

振動ローラ固有の特徴として、鉄輪を振動させて地面を転圧する点が挙げられる。そのため、振動を考慮したセンサや、設置機器には耐振動・耐衝撃性が必要となる。また、ステアリングがアーティキュレート機構のため、ステアリングが変化した際に、前後輪が変化するため機体の方向はステアリング角度に向かず、地面と鉄輪との間の摩擦を無視した場合、ステアリング角度の1/2の方向となる。これは、転動時に前後輪が同一軌跡を通るようにするためである²⁾（図-4）。

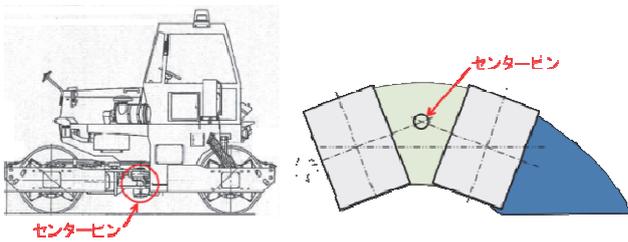


図-4 アーティキュレート型

3.2 走行アルゴリズム

振動ローラの施工中の走行は、図-5に示すように進入路走行、転圧路（1レーン）走行、車線変更に分類することができる。今回は、これらの走行経路の種類を個別にアルゴリズム化した。

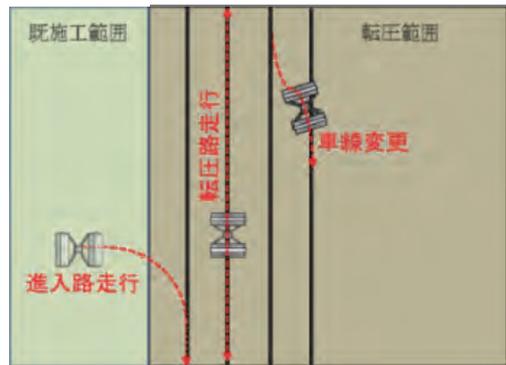


図-5 振動ローラの走行経路の種類

3.2.1 進入路走行

振動ローラが施工場所に進入した際に、機体の方向と1レーン目の転圧路の方向は一致することが望ましい。よって、進入経路は振動ローラの現在地の方向線と、1レーン目の転圧路に内接する円を用いて算出する方法とした（図-6）。

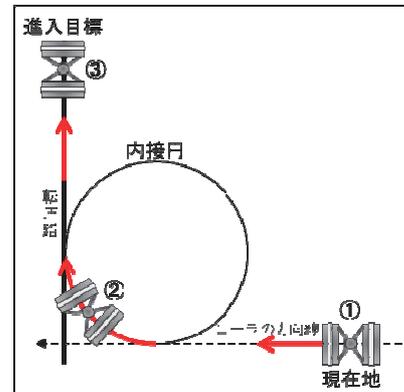


図-6 内接円を用いた進入路走行

3.2.2 転圧路走行

同一レーン転圧走行作業において、基本的には始点～終点の単純往復になるが、路面の斜度や状態等で計画路を逸する場合がある。これを修正できるように、レーン内に通過目標点として数点分割点を設け、進路を修正することとした（図-7）。

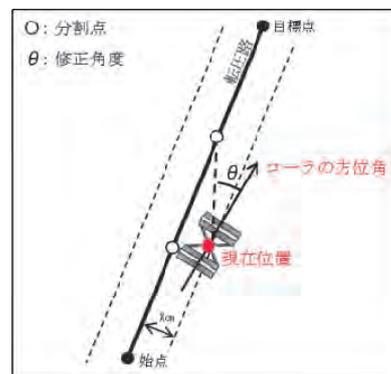


図-7 転圧路走行の制御

3.2.3 車線変更

次レーンへの車線変更は進入路走行と同様、機体の方向が次レーンの方向と一致する事が望ましい。よって、相応の曲率と曲線長を持ったS字カーブを描きながら車線変更を行う事とした。図-8は車線変更幅 400・600・800・1000mm の走行軌跡である。

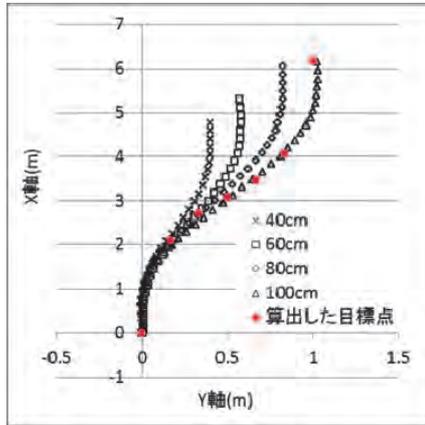


図-8 走行軌跡と計算値

4. 振動ローラの自律走行システム

本研究では、開発したアルゴリズムを以下のシステムに実装した。また、振動ローラの自律化を行うためにはセンサが必要であり、選定したセンサおよび選定基準を以下に記す。

4.1 システム概要

本システムの構成を図-9 に示す。トータルステーション (以下 TS と記)、振動ローラ (11t 級)、ホスト PC で構成されており、機器間は Wi-Fi で通信を行う。TS はジャイロ補正情報取得のため、常時測距を行いホスト PC 側に位置情報を送信している。一方、振動ローラでは自律制御用 CPU にて、取得したセンサ情報をもとに駆動部の制御量の演算を行い、更にホスト PC から送信されてくる情報を元にジャイロ補正を演算し、振動ローラを目標へ自己誘導を行う「慣性航法」にて走行～転圧作業を行う。

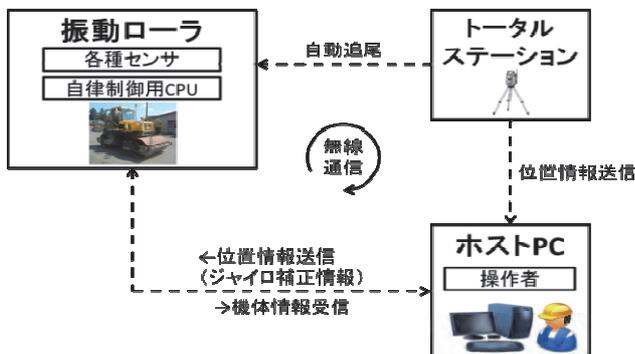


図-9 システム構成図

図-10 にホスト PC に表示される画面を示す。ホスト PC の表示画面では、振動ローラによる転圧回数における施工状況および振動ローラの機体情報を表示する。また、画面上のボタンにて、振動ローラに自律制御開始命令を送信することができる。

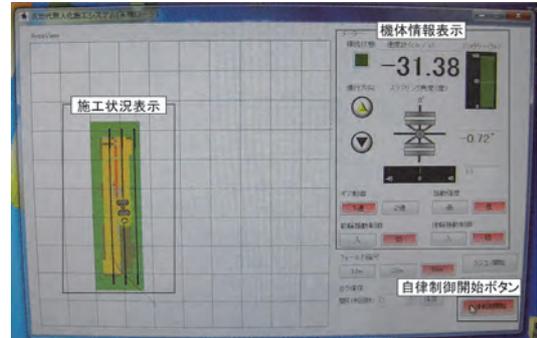


図-10 ホスト PC 表示画面

4.2 センサの選定

今回実証に使った振動ローラには、人間の五感に代わる以下のセンサ等の機器を搭載した。(図-11) 実機は、これらセンサ情報等を簡単に制御に反映できるよう、油圧弁制御が電子制御型となっている機体として、雲仙普賢岳等で実際に使用している遠隔操作仕様の 11t 級の振動ローラを使用した。



図-11 振動ローラと搭載センサ

以下に、振動ローラ (11t 級) に搭載したセンサを示す。

①搭載センサ

- 姿勢検出センサ (MEMS 型ジャイロ)
: 姿勢検出角度は±30° 以上とする。
- 速度検出センサ (ロータリーエンコーダ)
: 検出速度は 3km/h 以上とする。
- ステア角度検出センサ (ポテンショメータ)
: 検出角度は±60° (絶対角) 以上とする。
- 前方探査センサ (2D スキャナ)
: 検出範囲は前方および後方 3m とする。
- 車載カメラ (ネットワークカメラ)
: 設置条件として雲台無しでも可能なものとする。

- ・全周プリズム（トータルステーション）
：測定距離として自動追尾が 30m 以上可能なものとする。

5. 振動ローラの自律走行の実証

5.1 検証実験

本システムの自律走行精度を検証するための実験を行った。以下に設定した施工条件を示す。また、図-12 に実証実験の様子を示す。

- ・転圧回数：有振動 2 回/レーン
- ・レーン長：25m
- ・転圧路：3 レーン
- ・施工ラップ幅：0mm
- ・走行速度：1km/h



図-12 実証実験の様子

5.2 実験結果

有振動と無振動の自律作業を比較した結果、走行精度に大差はなく、搭載センサ類の耐振動性も十分であった。また、アーティキュレート機構の機械制御においては、車体中央が屈曲する際に前

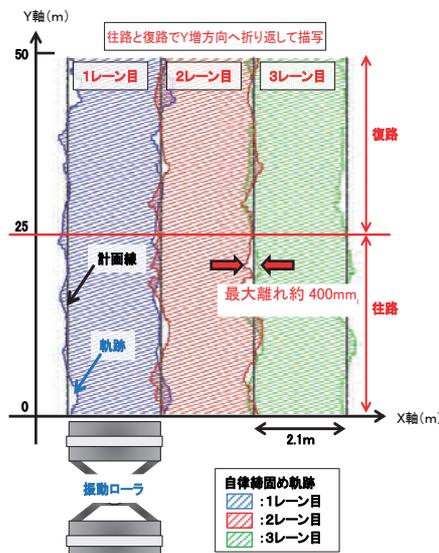


図-13 走行軌跡

後輪間で発生する不規則な挙動を、演算を工夫することで制御を行うことができた。

さらに、図-13 に示すように、隣り合う二つのレーン間の最大離れ（未転圧幅の最大値）は、約 400mm であった。そのため、現在の無人化施工にローラの施工重複幅の基準が 500mm（雲仙普賢岳周辺砂防ダム等特記仕様書等より）であることから、本システムを導入すれば現行の施工重複幅を 20% 程度減らすことが可能である。その結果、走行レーン数が減るため施工効率が向上すると考えられる。図-14 に施工効率向上のイメージ図を示す。

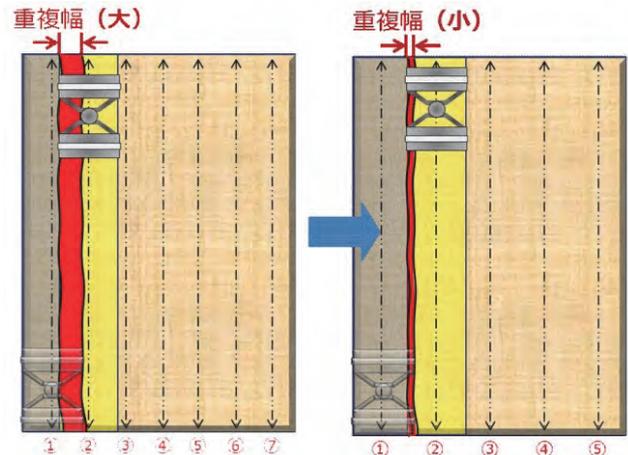


図-14 施工効率向上のイメージ

6. まとめ

今回の実証で、アーティキュレート機構の建設機械において、安価な MEMS ジャイロを使用した場合でも、独自の自律制御アルゴリズムを用いることによって遠隔操作時と同等以上の走行ができる事を確認した。ただし、今回は無人化施工仕様の振動ローラを使ったため、油圧制御が単純な ON-OFF 制御となっていた。理想的にはステアリングの油圧シリンダに比例制御を採用すれば、走行精度の更なる向上が期待できる。

謝辞

本技術開発にあたり技術的な支援を頂いております産官学委員会メンバーに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 近藤高弘・青木浩章・宮崎裕道：建設業における無人化施工の現状と将来，大成建設技術センター報，第44号，P.19～P.20，2011.
- 2) 栗原 庸聡・宮崎 裕道・青木 浩章・片山 三郎：振動ローラの自律走行の実証，大成建設技術センター報，第47号，P.19～P.20，2014.