

次世代無人化施工システム 自律制御型振動ローラー (T-iROBO®Roller) ～電制化用の外付けロボットを汎用機に搭載～

大成建設(株)技術センター

宮崎 裕道

大成建設(株)技術センター

正会員 ○青木 浩章

大成建設(株)技術センター

正会員 片山 三郎

1. はじめに

現在、災害復旧工事等に活用されている無人化施工は、写真-1 に示すように、現場の映像をモニターで見て常時操作する「モニター依存型」のシステムである。モニター情報は現実より視野が限られるため、奥行や周囲の状況が掴み難く、搭乗時では体感可能な、音や自機の傾き等の情報は得られずに運転を行うため、高度な運転技術を持つオペレーターが必要である。また、複数の映像取得のためのカメラ設備や、映像を伝送するための通信環境が必要となり、電波環境が整わない現場では、無人化施工の適用が困難な場合がある。こういった問題に対処するため、弊社では、雲仙普賢岳において無人化施工が開始された 90 年代半ば頃から、常時操舵不要の「自律制御型」の建設機械の開発を実施している。

当時は 3t 級トラクターショベルにて、障害物回避を含む走行～砂山の掘削～ダンプトラックへの積込作業を、自動化するシステムを構築した(写真-2)。当時考案した要素技術は、近年の小型高速化された演算装置や MEMS センサー等にリニューアルして 2012～2014 年に実施した国土交通省建設技術研究開発助成制度「次世代無人化施工システムの開発」にて適用した。その開発では、自律制御型振動ローラー(以下、T-iROBO® Roller と記載)と、割岩ブレーカー(以下、T-iROBO® Breaker と記載)を開発した(写真-3)。

その後 T-iROBO® Roller は、2015 年に国土交通省「次世代社会インフラ用ロボット開発現場検証」にて作業性能や安全性を評価された。しかし、建機メーカーから純正品として販売された全国的に見ても数少ない遠隔操作型の 11t 級両鉄輪振動ローラーを主機としていたため、汎用的な一般土工用の振動ローラーへの展開を期待する提言があった。本論は、その提言に基づき、2016 年度以降に開発した T-iROBO® Roller の汎用的な一般土工用の振動ローラー版の開発について、その要点となった電子制御化(電制化と記)と試験フィールドにおける実証結果について述べる。



写真-1 無人化施工状況



写真-2 自律制御型トラクターショベル



写真-3 建設技術研究開発助成制度の開発成果

キーワード 自律制御, 振動ローラー, 電子制御化, ロボット化, 自動追尾型トータルステーション
連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 TEL045-814-7247

2. T-iROBO® Roller について

(1) システムの概要

本システムの全体構成を図-1 に示し、写真-4 と以下に T-iROBO® Roller のセンサー構成を示す。

- ・方位センサー（GPS 方位計）
- ・車速センサー（ロータリーエンコーダ）
- ・ステア角度センサー（ポテンショメータ）
- ・前後方探索センサー（2D スキャナ）
- ・全周プリズム

（トータルステーション用、以下 TS と記）

振動ローラーに搭載された自律制御用 CPU は、自律走行アルゴリズムを持ち、各種センサー情報を元に制御量の演算と制御命令を行い自動走行する。本システムは、施工品質に直接係る転圧作業に用いられるため、未転圧部が残らないように高精度な走行が求められる。よって、自己位置を正確に計測し、自律制御用 CPU が計算した位置座標を補正するために、正位置計測システムとして、自動追尾型 TS を使用している（正位置計測は車載 GPS でも可能）。

以前の T-iROBO® Roller は、無人化施工を対象としていたため「遠隔操作仕様」であった。よって、遠隔操作室などの車外の遠隔地にホスト PC を設置し、車体と常時通信して運行状態や、車両状態等を監視する仕様としていた。しかし、2016 年度以降では、システムの簡略化と、無人化施工以外の現場でも適用できるように、以下の二点を改良した。

- ・ホスト PC の車載化
（遠隔操作室不要）
- ・ホスト PC を使わない操作・車両情報監視
（ハンディーデバイスによる操作と

車載 LED パネルによる車両情報表示）

ホスト PC を車載することで、設置に場所と手間が掛かる遠隔操作室は不要で、オペレーターは写真-5 の様に、ハンディーデバイスを用いて作業開始命令等を与えることになり、無人化施工でない通常現場においても導入し易くなった。今まで、自律走行作業中に監視していた車両情報は、車載した LED 掲示板上でステータスを確認可能である(写真-6)。これは、自律作業する機械と通常作業機械が、近接協働する場合などにおいて適用すれば、作業の「見える化」を支援できるものと考えている。

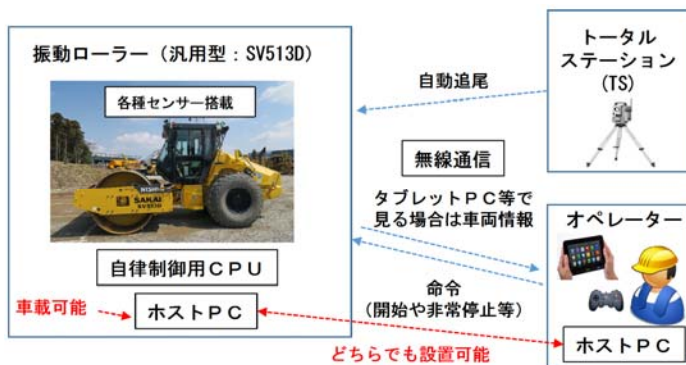


図-1 システム構成図



写真-4 機体とセンサー類構成図



写真-5 ハンディーデバイスによる操作状況



写真-6 車載 LED のステータス表示

（２）自律走行の作業計画

T-iROBO®Roller は、ホスト PC に図-2 に示す施工条件データを入力すると、そのデータに基づきレーン数と走行基線（レーンの中心線：緑矢印）を自動構築する。その後、作業開始命令を与えると、走行基線に沿って走行するよう自律制御を行う。レーン走行において傾斜や凹凸があっても直線性を保ちながら走行することと、次レーンに移る際の「レーンチェンジ」の正確性は、搭乗作業においても熟練度の差が出やすい要素である。この点を、独自のアルゴリズムにより、正確に実施できるところが T-iROBO®Roller の最大の利点である。

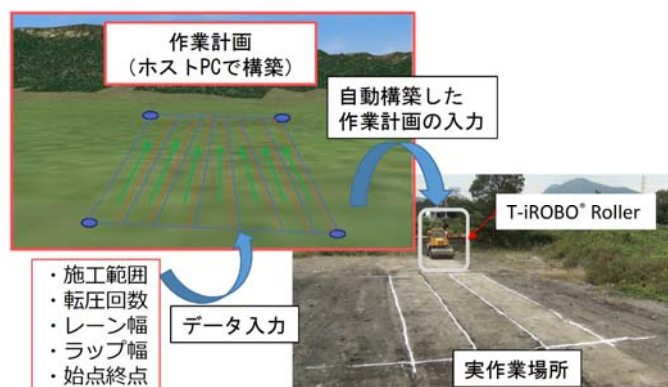


図-2 作業計画

３．遠隔操作仕様建設機械の電制化について

（１）過去の事例

90年代半ばから行われている無人化施工では、建機メーカーから純正品として販売された、電制型の遠隔施工仕様の建設機械を用いるのが一般的であった。これは、オペレーターが操作リモコンを用いて送信する電気信号を、油圧制御用の電磁弁等に施す機構になっており、重機操縦桿の外観上は大きく変化することが無いため、無人化施工であっても、通常施工であっても特段の配慮無く使用が出来るものであった。しかし、電磁弁を搭載していない機械や、ハンドルの様な回転機構を直接操作するものについては、押引・回転機構等を持つシリンダーやモーター等を、操縦桿に外付け設置し、それらを電気制御することで遠隔操作仕様としていた。当初開発したトラクターショベルは、電制化されていなかったため、写真-7 に示すよう電制型の小型シリンダーを重機の操縦桿に直接接続し、演算される自律制御命令を、機械側に伝達することに成功していた。



写真-7 当初の制御機構

この方法は、重機側に押引・回転等の機構を確実に設置することが寸法的に機構的に困難である場合が多く、改造設置に非常に時間を要していた。また、外付け機構としたものは操縦桿を覆い、手動操作が困難なものや、運転席自体を占拠するものも多く、通常施工機械として利用することが困難な、「遠隔施工仕様専用機化」してしまうことが多かった。

写真-8 に前述した T-iROBO® Breaker の要素実験のため、0.8t 級油圧ショベルを電制化したものを示す。当機は非電制型の超小型機であり、操縦桿と油圧制御弁が非常に密な状態で配置されていた。電制化のため、搭乗操作に必要な操縦桿を撤去し、電制ステッピングモーターを設置したもので、電制化と引き換えに搭乗操作が完全にできなくなった例である。



写真-8 遠隔仕様専用機となった例

(2) 今回開発品

今回開発したものは、写真-9 のように電制可能な小型ステッピングモーターを使用し、重機側に大きな改造を施さず、自律制御を実施しない通常搭乗時も操舵可能な、外付け可能なロボット機構である。

ハンドル部は、ロボット機構装着時でも操作ができるよう、ハンドル下側は極力装置を覆わない形状としている。簡単に脱着が出来るように、ハンドル操作する車両系建設機械には搭載が多い、「ハンドルグリップ」を把持しながら回転するものである。ロボットはハンドルグリップを覆うような形状で把持しており、完全固定はしていないため、脱着が容易である。中心位置から約三周回転で、片側限界まで舵切ることができる。

T-iROBO®Roller の走行直線性とレーンチェンジの正確性は、このハンドル部のロボットの回転力の能力算定が要点で、直径 36cm のハンドルで $5\text{N} \cdot \text{m}$ 、60rpm 程度の能力とした。

アクセル部は前後に動く機構となっており、通常作業時に使用するグリップ部を加工すること無く、操縦桿シャフト部に治具を設置し、ロボット用のステッピングモーターと連結した。能力的には操縦桿の回転固定部から 10cm の位置において $10\text{N} \cdot \text{m}$ 、100rpm 程度の能力とした。その他の自律制御に必要な機械スイッチは、PLC(programmable logic controller)にミニチュアリレーを組合せて電制化した。



写真-9 外付けロボット機構

4. 走行性能について

(1) 自動追尾 TS と GPS 搭載の比較

上記のロボット機構を、写真-10 に示す片鉄輪型の振動ローラー（酒井重工業社製 SV513D）に搭載し、試験フィールドにおいて自律走行した。試験フィールドは多少の凹凸が有るものの平坦で、電波の影響などが無い良好な環境である。作業計画により構築した走行基線に対し、どのくらいの誤差で自律走行できるのかを実証した。

正位置計測システムとして、図-3 のように自動追尾型 TS と GPS を用いて次の条件のもと実証した。実験フィールドの概要は、下記の通りである。

- ・ 走行速度：3km/h
- ・ レーン長・数：20m×3レーン×2往復／レーン（レーンチェンジを2回実施しているが本実験結果においては、評価対象から外している）
- ・ TS 追尾距離：最大 30m（計測精度公称：±10mm）
- ・ GPS：RTK仕様（水平計測精度公称：±20mm）

TS は高精度で計測可能だが、ターゲット(機体)をレーザーで自動追尾するため、その軌道に遮蔽要因があってはならない。従って、ダム工事の袖部のような、全施工エリアが見渡せ、施工時の振動等の影響が波及しない高台



写真-10 振動ローラー（SV513D）

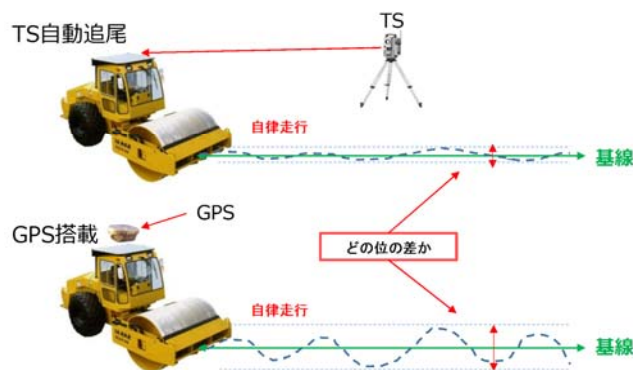


図-3 正位置計測システムの比較実験

等があれば、高精度が期待できる TS を導入すべきである。一方、GPS は TS に比べると誤差が大きく、全天ひらけた場所でないと使用できないが、GPS は車載が可能であるため、TS の電源供給の手間と日々の設置撤去の手間を考慮すると、導入のしやすさは TS に比べると遙かに GPS の方が簡易である。図-4 に示す走行結果を見ると、誤差量の σ と平均値については大きな差が確認できないが、最大値に大きな差が出ている。本システムでは、先に述べたよう高精度な走行のため、正位置を計測して自律制御用 CPU が計算した位置座標を補正する機能としても、GPS と TS 両者の計測結果を使用している。よって、誤差の大きい GPS 計測値を補正值として扱ったことにより、基線から誤差のある方向に走行し、走行精度に差が出たものと判断している。

(2) 長時間運転実験

また、精度が高い TS について、以下の要領で 120 分間の連続試験走行を実施した。その結果を図-5 に示す。

- ・走行速度：3km/h
- ・レーン長・数：50m×4 レーン×5 往復／レーン
- ・TS 追尾距離：最大 60m（計測精度公称：±10mm）

図-5 にその結果を示す。結果において、3 回突出した誤差量が検出されているが、走行レーン中心にある基線から離れる「レーンチェンジ」を行っているためであり、レーンチェンジ後に大きな誤差を検出していないため、次レーン走行に円滑に移行したことを示している。長時間実施した図-5 の σ や平均値の結果は、図-4 と比較しても概ね予想したものであり、汎用機械に外付けした電制ロボット機構において、平均 12cm 程度の走行精度で自律制御を実証できたと考えている。

位置計測システム別誤差値

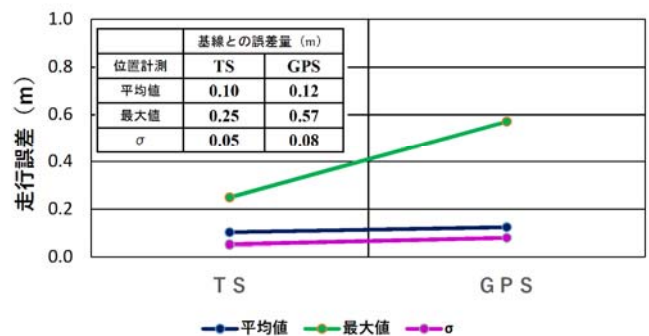


図-4 試験フィールドにおける走行結果
(データ数：2700)

TS自動追尾システムを適用した時の誤差量

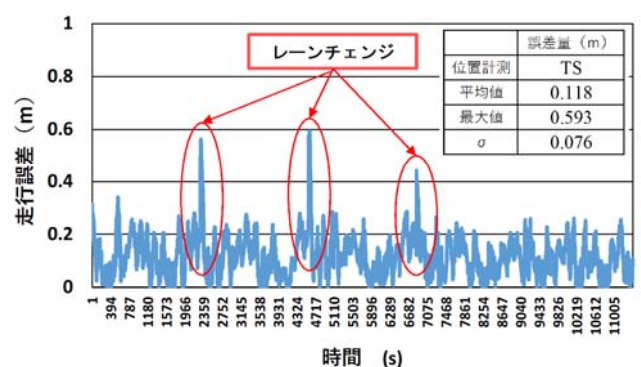


図-5 連続走行試験の結果
(データ数:11,200)

5. おわりに

大規模な無人化施工時には、特殊作業用非電制建機を遠隔操作型に改造することが求められることが有り、改造に費用と時間を要していた。既存機械に後付で電制化が簡単に出来るロボット装置は、自律制御だけでなく、無人化施工にも役立つものと考えられる。

建設機械の自律制御技術は、現場を知る我々建設業界が考案する部分であるアルゴリズムと、電子装置、電波通信、情報処理、建設機械等の個々のハードウェアが最適に機能して成り立つもので、ICT が占める割合が高い。近年、国土交通省が推進している i-Construction により、ICT が急速に建設業界に流入していることは、この技術にとっては追い風である。この契機に、実現場で活用ができる、安全で完成度の高いシステムの構築を目指したいと考えている。

参考文献

- 1) 宮崎裕道・青木浩章・片山三郎、次世代無人化施工システムの開発－自律制御による転圧作業－、第 15 回建設ロボットシンポジウム公演集, P.O-62, 2015
- 2) 宮崎裕道・青木浩章・片山三郎：建設機械の自律化に関する研究、安全工学シンポジウム 2017 公演集, P.172～175, 2017