

|| 投稿論文 ||

無人化施工現場におけるクローラダンプの自律走行システムの構築と実験

阪東 茂^{*1}・長谷川 忠大²・油田 信一³・北原 成郎⁴

¹ 株式会社 Doog 技術主任 (〒 305-0031 茨城県つくば市吾妻 3-18-4)

E-mail : shigerubando@doog-inc.com

² 芝浦工業大学 教授 工学部電気工学科 (〒 135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

E-mail : thase@shibaura-it.ac.jp

³ 芝浦工業大学 客員教授 SIT 総合研究所 (〒 135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

E-mail : yuta@shibaura-it.ac.jp

⁴ 株式会社熊谷組 ICT 推進室長 (〒 162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1)

E-mail : skitahar@ku.kumagaigumi.co.jp

本稿は、実際の作業で使用しているクローラダンプを対象に、現状の無人化施工現場で使用されている遠隔操作システムを大幅に変更することなく、その走行を自律化する走行制御システムの構築について報告する。本システムは、若干のセンサ等を車両に付加するのみで実現しており、現状の無人化施工の遠隔操作システムとの親和性が良い特長がある。車両の自律走行制御の基礎となる車両の自己位置推定法と自律走行制御アルゴリズム、およびクローラダンプへの実装方法を述べ、それらの実証実験の結果を報告する。

キーワード：無人化施工、重機の自律走行、経路追従アルゴリズム

1. はじめに

無人化施工とは、危険区域内における除石や水路の掘削あるいは砂防堰堤を建設する等の工事を、安全なエリアにいるオペレータが遠隔操作により行う施工法である。オペレータは、現場より送られて来た映像を見ながら、重機を運転して作業を進める¹⁾。この工法は、1990年代の雲仙普賢岳の火砕流の恐れがある中での土石流への対策工事など²⁾を契機として本格化した。その後、我国各地における火山噴火や大規模崩落などの自然災害への応急的対処工事に多く適用されている。しかし、その技能を有するオペレータの確保が難しいことに加え、オペレータが重機に搭乗して行う通常の工法に比べて作業効率が低く、また、オペレータへの負荷が大きいという問題点が指摘されている。これらの問題を解決するため、無人化施工の現場において、情報化施工(マシンガイダンス)や重機の自律運転等の導入の試みが行われている。

著者らは、それらの試みの一つとして、オペレータが遠隔操作で運転している車両の走行を部分的に自律化する

るシステムについて、実験システムを開発し実験を行った。開発および試作したシステムは、遠隔操作室に置いたコントローラに重機本体の走行動作を自律的に制御させるものである。これにより、実現現場における遠隔操作のために整備されている通信インフラをそのまま利用して、オペレータの遠隔操作の信号を自律走行用の信号に置換えることで、本自律走行システムを実現することができた。したがって、実際に無人化施工の現場で使われている機器に大きな変更を加えず、自律運転が実現されている。

2. 無人化施工と本試みの目的

2.1 無人化施工のシステム構成と問題点

無人化施工のシステムは、安全な位置におかれた操作室とカメラや無線装置を搭載した建設機械で構成される¹⁾。人の立ち入りができる安全エリアには、現場と遠隔操作室を繋ぐ有線通信設備や、重機との無線通信のための中継器が設置されている。また、安全エリア内に、工事に必要な資材を蓄え、または積み替えるための基地が設けられている。無人エリア内の施工現場で働く重機は、遠隔操作機能を有し、カメラ等を搭載している。操作室で

*本実験実施時点では筑波大学知能ロボット研究室に所属

は、重機のオペレータが、現地から送信される複数の映像を見ながら各々の重機を操縦する。しかし、現状では、無人化施工におけるオペレータの負荷は大きく、また、作業効率は有人で作業を行う場合に比べて低いことが指摘されている⁴⁾。

2.2 無人化施工における自律化の試みと本取組の目的

無人化施工において、オペレータの負荷の軽減や効率向上を行う手段として、情報化施工の適用や、自律運転の導入が考えられている。情報化施工の1つとして、オペレータによる重機の操作を支援するマシンガイダンスがある⁵⁾。これは、オペレータが見るモニタ上に、設計情報とセンサにより測定された実際の施工対象の形状の情報を同時に表示して操作の支援をするものである。このマシンガイダンスは、無人化施工においてもオペレータの負荷軽減や作業効率の向上に有効と考えられ、近年、様々に取組まれ導入が進んでいる⁵⁾。また、重機の自律運転も、建設機械のロボット化として従来より興味を持たれてきた⁶⁾。しかし、多くの従来の試みにおいては、自律運転システムを働かせるために、施工現場の環境を整備する必要がある。現在使われている無人化施工のシステムをベースに、対象の現場や作業システムを大きく変えることなく、実際の作業におけるオペレータの負荷を軽減できることが望まれている。

無人化施工における作業の中で、自律運転が比較的容易であり、かつ、オペレータの負荷の軽減が期待できるものとして、クローラダンプや振動ローラなど、低速の運搬車両の走行が挙げられる。特に、クローラダンプによるコンクリートの打設面の湿潤を目的とした散水作業や、振動ローラによる締固め作業は、単調な往復走行の繰り返しであり、走行制御の自律化自体は比較的容易であると考えられる。

そこで、著者らは、現状の無人化施工現場で実際の作業で使われているクローラダンプを対象に、その走行制御を自律化するとともに、オペレータに使いやすく、現状の無人化施工システムと親和性が良い実験システムを構築し作業遂行の実験を行うこととした。

実験システムの構築に当たっては、実現場で行っている作業に鑑みて、実験システムを適用する具体的な実験環境・作業を決める必要がある。そこで、本自律走行システムが稼働すべき対象の環境と作業を、国交省雲仙復興事務所による普賢岳地区の土石流等の災害対策事業の中で、(株)熊谷組が施工を担当した赤松谷11号床固工³⁾の無人化施工工事とし、ここで用いられるクローラダンプ(キャタピラー社製 LD1000E)について走行の自律化を試みた。この現場において、クローラダンプによる打

設済みコンクリート面への散水作業とモータプールから作業現場までの往復の走行を自律化することを具体的なターゲットとして選び、システムの構築と実験を行った。

3. 自律走行システムの概要

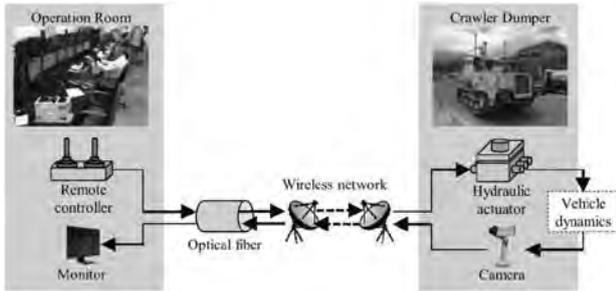
3.1 既存の無人化施工システムの構成

本試みを行った現場では、遠隔操作による各種の建設機械が働いている。遠隔操作室とこれらの建設機械は、光ファイバによる通信路および、有線LAN、無線中継器、無線LANにより結ばれており、すべての機器は、TCP/IPまたはUDPを用いた通信によってデータの送受信が行われている。遠隔操作室には、オペレータの操作用コントローラ、カメラの画像を写すためのモニタ、無人化施工用の重機と通信するための機器がある。一方、無人エリアで動く重機には、無線の送受信機、受信した命令に基づいて重機を動作させる制御機器、および、重機の前方向や周囲の状況を把握するためのカメラが搭載されている。また、一部の重機には情報化施工の一環として、RTK-GNSSを用いた高精度かつリアルタイムに現在位置の測位ができる機器が搭載されている。例えば、振動ローラには、コンクリートの締固め作業の施工記録を行うため、GNSS測位システムのアンテナと受信機も搭載されており、遠隔操作室では、その測位結果を無線通信経由で受信し、施工の記録を行っている。

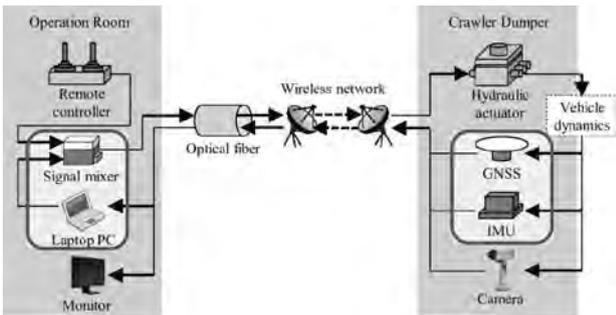
3.2 走行の自律化のための追加要素

本取組みでは、既存の無人化施工システムが持つ通信系をそのまま利用すると同時に、これに付加する搭載センサ等のハードウェアとソフトウェアの修正をなるべく少なくすることを条件とした。ここでは、オペレータによる自律走行機能の利用のための操作を単純化することを目的とした。また、自律走行が働いているときは、オペレータは必要に応じて各車両の状況を監視し、いつでもオペレータの遠隔操作による操縦に切り替えることができるようにして、実験時や実使用時の従来システムとの親和性と安全性を確保することも条件とした。

本取組みにおいて構築した自律走行システムの大きな特徴は、図-1に示す通り、自律走行のためのコントローラが遠隔操作室に設置され、いわゆるリモートブレイン⁷⁾の構成になっていることである。現場で働く運搬車両は、無線通信を経由して遠隔操作室から届く車両の操縦信号に従って動作しており、その信号がオペレータによって与えられた信号であれ、自律走行のためのコントローラによって生成された信号であれ、車両における制



(a) クローラダンプにおける既存の遠隔操作システム



(b) クローラダンプにおける自律走行システム

図-1 既存の遠隔操作システムと構築した自律走行システムの比較

御動作に差異は無い。現場で働く重機については、通信を経由して操作室に接続された若干のセンサが追加されているだけである。本実験では、GNSS 測位システムと IMU のみを車両に追加搭載した。また、遠隔操作室には、自律軌跡追従制御のプログラムを実行して車両の駆動信号を出すための PC と、遠隔操縦用コントローラの信号と PC が生成した自律走行用の信号を切り替えるための制御信号ミキサを追加した。制御信号ミキサは、オペレータが介入すると、いつでもそちらが優先され車両が操作されるものとした。

3.3 走行軌跡の管理

本取組での車両が走行すべき軌跡は、国土交通省が規程した平面直角座標系の 1 系を使用し、海拔 0 m の水平面上へ投影して得られる 2 次元の座標値によって管理することとした。この座標系は、工事の施工図面の座標系として用いられており、自律走行中にリアルタイムで GNSS 測位システムから得られる緯度と経度、標高の情報は、この直交座標系へ変換して使用した。

車両が走行すべき軌跡の情報は、事前に、自律軌跡追従制御用の PC に準備する。車両が走行すべき軌跡は、自律走行を開始する地点を起点とした多数の線分の列として表現する。具体的には、走行すべき軌跡を構成する各線分は、その線分の番号を $n(n = 0, 1, 2, \dots)$ として、

- ・ 追従すべき各線分の始点 L_{nS} と終点 L_{nE} の座標値 (n は線分の番号)

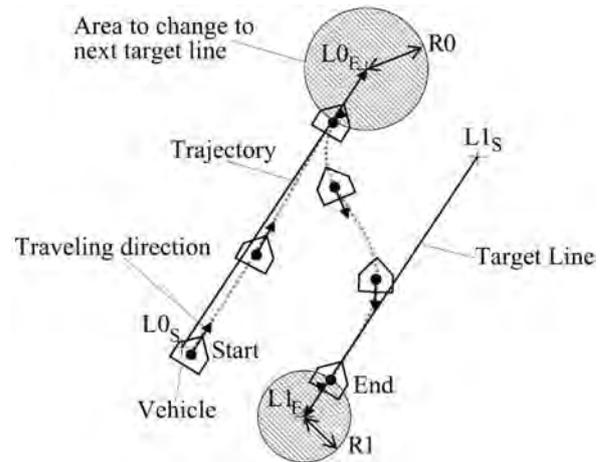


図-2 経路計画のためのパラメータおよび追従すべき線分切替の概要

- ・ その線分区間を車両が走行する向き (前向き / 後ろ向き)
- ・ 線分の終点 L_{nE} に到達したと判断し、次の線分に乗換える。終点 L_{nE} を中心とする円の半径 R_n により表現する。

車両は、起点から与えられた線分を次々に切り替えながら、それに沿って走行し、最終の線分の終点で走行を停止する。各線分の追従は、その時点で走行すべき線分と自分の位置・方位の相対関係に基づいた車両の旋回動作の制御により行い、その線分の終点に達したと判断したときに、次の線分を追従する制御に切り替えられる。したがって、この線分の列の終点と始点は各々繋がっていてもよく、繋がっていない区間は、旋回動作の制御のアルゴリズムや車両の走行性能によって詳細の軌跡が決定される。図-2 に、第 0 線分と第 1 線分が与えられたとき、車両の走行がどのように制御されるかを例として示す。

3.4 処理の構成

本取組で開発した自律走行システムは、若干の凹凸のある領域も走行するが、2 次元平面上で、走行軌跡の指示、位置の推定、自律走行制御を行うこととして、図-3 に示す通り下記の 4 つの処理で構成した。

- センサから得られた情報から自己位置の推定をする処理
- 追従すべき線分を切り替える処理
- 追従すべき線分に追従させるよう時々刻々の車両の並進速度と回転角速度の目標値を算出する処理
- 車両の動きが、与えられた並進速度と回転角速度になるよう油圧アクチュエータを制御する処理

自己位置を推定する処理 A) では、GNSS や IMU の情報に従って、現在の車両の代表点の位置と車両進行方向

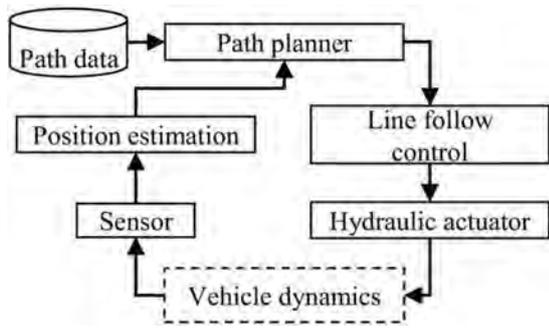


図-3 自律走行における処理プロセス

の方位、並進速度と回転角速度の推定を行う。出力は $(x, y, \theta, v, \omega)$ で表される。ここで、位置情報は地表の水平面で定義された2次元座標値、並進速度は前進を正とした1次元の値であり、方位と回転角速度はヨー角方向のみを表現する。ここで、車両の走行速度は最大1 m/s程度と想定し、自己位置の情報は、0.2 s 間隔で更新をすることとした。

追従すべき線分を切り替える処理 B) では、自律走行制御のプログラムが自己位置の監視をして追従すべき線分を順に切り替え、最後に記録された線分の終点に到達すると車両を停止させる。線分の切り替えは、図-2 に示すように、車両の代表位置が、追従すべき線分の終点から指定された半径の円以内に入った場合に行う。

軌跡追従のための並進速度と回転角速度の算出処理 C) では、上記の自己位置推定結果と追従すべき線分の情報を基に、走行中常時、指定された線分に追従するように車両の目標並進速度 v_{tgt} 及び目標回転角速度 ω_{tgt} を算出する。

物理的な制御を行う処理 D) では、車両のメカニズムを考慮して、その並進速度と回転角速度に車両が目標値となるようにフィードバックに基づいて車両の油圧アクチュエータの操作量を決定し、油圧制御装置へ指令値を送信する。

3.5 ソフトウェアの実装

今回の取組では、遠隔操作室で行う車両の走行制御に

は、ノートパソコンを使用し(CPU: Core i7-4600U 2.10 GHz, RAM: 8 GB), Linux(Ubuntu 14.04 LTS)上で動作することを前提に、各種処理を行うプログラムを作成した。車両の走行制御において、複数のセンサデータを取得し、それらのデータを複数のプロセスで同時に使用する枠組みとして、竹内らが提案・開発したSSM (Sensor Sharing Manager) と呼ばれるライブラリ¹²⁾を使用した。ソフトウェアの構築においては、複数のプロセスでセンサデータや制御信号を共有してクローラダンプの走行制御系の処理を構成した。これらのプロセスは、図-4 に示すように、センサのデータを受信して共有メモリ空間(SSM)にセンサデータを書き込むプロセスと、共有メモリからセンサデータを読み出して、油圧アクチュエータや画面へ処理結果を出力するプロセスに分かれる。処理内容毎にプロセスを分け、モジュール化と共通化を行うことで、個別に作成する部分を削減し、効率的なソフトウェアの開発を実現した。

4. 制御アルゴリズム

4.1 車両の位置と方位の推定

車両の走行を制御するためには、車両の位置と方位を常に求めていることが不可欠である。本取組で対象とした車両の制御において、車両の代表点の位置は数センチメートルの精度で得られれば良い。したがって、これは車両に搭載したRTK-GNSSの出力を用いて、それをGNSSアンテナの位置から車両の代表点の位置に変換することとした。一方、指定した線分に追従させるため車両の方位は数度の精度で推定したいが、RTK-GNSSが与える方位情報は車両の制御に利用できるだけの精度を有していない。そこで本取組においては、方位をIMUとRTK-GNSSを併用して推定することとし、多摩川精機製のIMU、AU7428Nを各車両のGNSS受信機と同じフレームに搭載した。なお、このIMUは3軸のセンサであるが、本取組では3軸のうちヨー角のみを利用している。

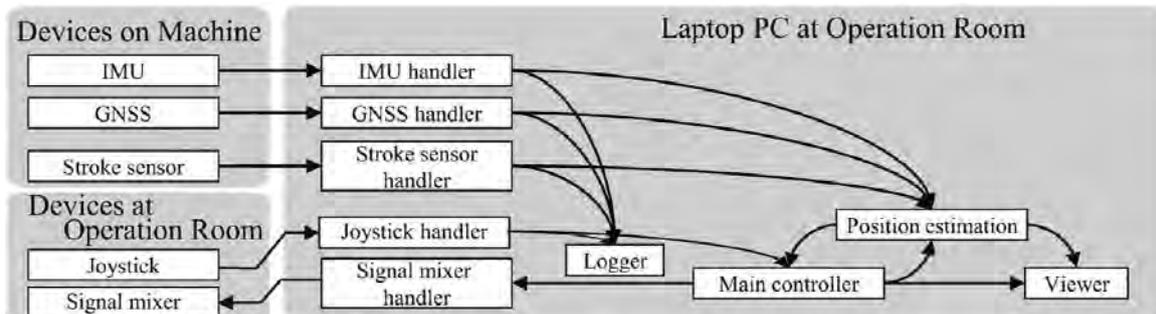


図-4 自律走行におけるソフトウェア構成

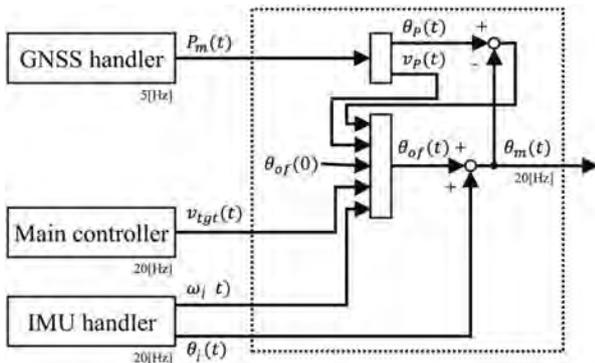


図-5 方位推定システムの処理の流れ

このIMUでは、方位情報はジャイロセンサの出力する角速度情報を積分して計算する。したがって、角度情報には初期値が必要であり、また累積計算の誤差がドリフトエラーとして重畳される。一方、RTK-GNSSを用いて各時刻の位置の差から求めた動きの方位情報は、ランダムな誤差は含むものの累積誤差なしに車両の進行方向を示す。したがって、車両がスリップせずに走行している限り、RTK-GNSSによる各時刻の位置の差より求められた方位は、IMUによる方位情報の累積誤差のキャンセルに利用できる。ただし、RTK-GNSSによる推定位置はランダムに数cmという短い時間内で移動量を計測するには比較的大きな誤差を有する。そのため、その差分の方位を扱うのは注意が必要である。そこで、まず、位置の差が小さく車両の並進速度が遅い場合、および、車両やGNSSアンテナの揺れが予想される車両の旋回時には、修正は行わないこととした。さらに、RTK-GNSSによる位置の差から求めた方位情報を時定数十秒程度でスムージングしつつ、IMUによる方位の累積誤差を修正することとした。具体的には、以下の方位推定システムを構成した(図-5)。

- 1) 方位の初期値をリセットしゼロとおいたIMUの方位出力を $\theta_i(t)$ とし、初期方位とIMUの方位の累積誤差の和をIMU方位オフセット $\theta_{of}(t)$ として、車両の方位は

$$\theta_m(t) = \theta_i(t) + \theta_{of}(t) \quad (1)$$

で求めることとする。

- 2) 各時刻のRTK-GNSSの位置情報を $x(t)$, $y(t)$ とする。車両の推定速度

$$v_p(t) = \frac{\sqrt{(x(t) - x(t-1))^2 + (y(t) - y(t-1))^2}}{dt} \quad (2)$$

が決められた閾値 v_m より大きく、IMUが出力する車両のヨー角の角速度 ω が決められた閾値より小さいとき、RTK-GNSSの推定値の差による車両移

動方位(車両の向き)を

$$\theta_p(t) = \tan^{-1} \frac{y(t) - y(t-1)}{x(t) - x(t-1)} \quad (3)$$

で求める。ただし、車両が後退しているときは $\theta_p(t)$ に 180° を加えて、車両(正面)の向きを反転させる。

- 3) 方位オフセット $\theta_{of}(t)$ は初期値を車両の初期方位とし、 $\theta_p(t)$ が求められたときは

$$\theta_{of}(t) = \theta_{of}(t-1) + W(\theta_p(t) - \theta_i(t) - \theta_{of}(t-1)) \quad (4)$$

により、 $\theta_{of}(t)$ を修正する。ここで、 W は修正の重みであり、スムージングの時定数を20秒、RTK-GNSSにより測位置サイクルを0.2秒毎とすると、 $1/100$ 程度とすれば良い。

4.2 直線軌跡追従制御

2次元平面上でノンホロノミックな車両を目標とする軌跡に追従して走行させるためには、その並進速度と回転(旋回)角速度を制御する。本取組においては、その制御の方式は、筑波大学知能ロボット研究室で開発された手法⁸⁻¹¹⁾に従った。この手法では、車両を直線で与えられた軌道に追従させるため、まず、その車両が維持すべき各時刻の目標並進速度と目標回転(旋回)角速度を、その時点における車両の位置と方位および速度と角速度に基づいて計算する。

図-6に示すように、追従すべき直線の向き $\theta_l(\text{rad})$ とその直線を通る2次元平面上の1点の座標 $\{x_l, y_l\}$ で表したとき、車両の代表点の位置 $\{x, y\}$ と直線の間の符号付きの距離は

$$d(t) = (x - x_l) \sin \theta_l + (y - y_l) \cos \theta_l \quad (5)$$

で求められる。この $d(t)$ を0に漸近させるため、車両が追従すべき直線から $d(t)$ 離れたときには、車両の目標直

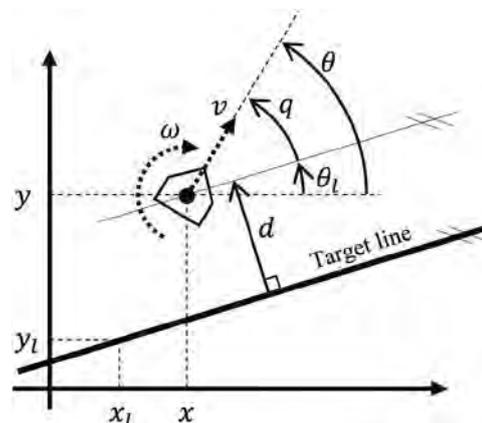


図-6 ライン追従制御のためのパラメータの定義

線に対する方位を、距離 $d(t)$ に比例した進入角の目標値

$$q_{ap} = -K_1 \cdot d(t) \quad (6)$$

となるべくフィードバック制御することとする。ただし、ここで q_{ap} の値は、 $-\pi/2$ から $\pi/2$ の間に限定することとし、式(6)がこの範囲を越えたときは、 q_{ap} は $-\pi/2$ か $\pi/2$ でクリップされた値とする。次に、車両の向きを θ としたときの車両の目標直線に対する車両の相対方位

$$q = \theta - \theta_l \quad (7)$$

が、上記の $d(t)$ に対応して定められる進入角 q_{ap} に追従させるよう、車両の回転角速度の目標値を

$$\omega_{igt} = K_2 (\theta + q_{ap} - q(t)) \quad (8)$$

とする。これにより、車両と目標直線との相対位置・方位から車両の目標角速度が定められる。ここで、 K_1 と K_2 はフィードバックに関する定数であり、軌跡追従の安定性と応答性を決めるパラメータとなる。これらの値は実機の油圧機器の応答性や走行させる並進速度とも関係して決める必要があり、本取組では実機による実験結果に基づいて定めることとした。また、車両の目標とする速度は、線分毎に予め定められた一定値とした。

最後に、車両の実機の動きが、この目標角速度となるように油圧制御系を動作させるが、これについては次章の実装の項で述べる。

5. クローラダンプへの実装

キャタピラー社製クローラダンプ LD1000E を対象に自律走行制御系を構築した。このクローラダンプは、車両の左右に履帯があり、左右の履帯の内部にある油圧モータが回転することで走行する。対象とした現場では、荷台に散水用のタンクとノズルを搭載し、コンクリート打設面の湿潤維持の散水作業を行う目的等で使用されていた。このクローラダンプには、遠隔操縦のため無線 LAN による送受信機と電磁式油圧弁が搭載されており、左右の油圧モータに対する作動油の流量を変化させて車両の制御が行われている。遠隔操作時には、操作レバーの各々の角度情報が車両に伝えられ、それにより油圧モータに流れ込む作動油の量を変化させ、履帯の進行速度が制御される。

5.1 代表位置と方位の計算方法

このクローラダンプの制御のための代表位置は、左右履帯の中心点を結ぶ線分の midpoint とした。また、代表方位は履帯の長手方向に平行とし、かつ、運転席の向きを正

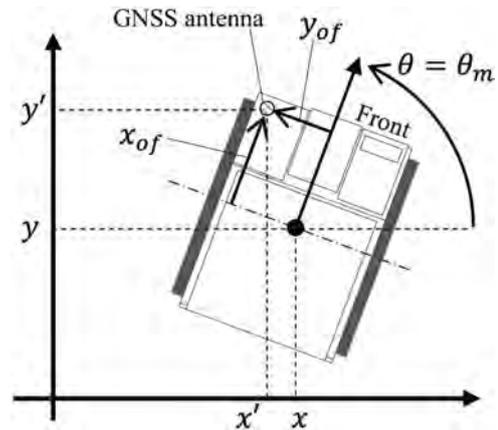


図-7 クローラダンプに関するパラメータの定義

方向とした。このクローラダンプでは、搭載物の配置の都合上、図-7に示すように、GNSS 測位用のアンテナは車両の代表位置からずらして搭載されている。従って、車両の代表位置は、GNSS 測位によって得られたアンテナの位置の座標値より幾何変換を行って求めている。車両の代表方位は、車両の形状が変化しないため、メインフレームの方位とした。

5.2 油圧アクチュエータの操作量の決定

このクローラダンプを遠隔操作する場合、オペレータは、遠隔操作室の画面上に表示される映像を見ながら車両の位置と方位を判断し、走行すべき軌跡に基づいて操作卓の2本のレバーを操作する。本取組では、自律走行時には、遠隔操作室に置いた自律走行制御用の PC から出力される制御信号を、このレバー出力に対する値(以下、レバー操作量と呼ぶ)として、これをクローラダンプに送信する。自律走行制御用 PC 内では、まず、直線追従のための目標並進速度 v_{igt} と目標角速度 ω_{igt} を第4章に示した方法で計算し、次いで、左右の油圧モータに対するレバー操作量を決定する。

それにしたがって、ここでは、まず目標とする並進速度と現在の並進速度の差分値よりレバー操作量の基本となる値を計算する。次いで、目標の直線に追従するために必要な角速度を計算し、そこから左右の油圧モータに対するレバー操作量のバランスを決定し、最終的に、左右の履帯駆動用油圧モータに対するレバー操作量 $\{lev_R, lev_L\}$ を決定することとした。ここで、 $\{lev_R, lev_L\}$ は、最小値-1から最大値1の範囲とし、この値が正のとき前進方向に履帯が回転する。

並進速度の制御は、式(9)に示すように、目標並進速度 v_{igt} と現在時刻 t における並進速度 $v(t)$ との差分に基づきレバー操作量の基本値 lev_{base} を次の通り計算することとした。

$$lev_{base}(t) = lev_{base}(t-1) + \Delta t \cdot C \cdot (v_{tgt} - v(t)) / A \quad (9)$$

ここで、 Δt (s)は制御周期、 C (1/s)は速度制御の時定数、 A はレバー操作量と速度に関する係数である。ついで、現在の車両の角速度 $\omega(t)$ と目標角速度の差分値 ω_{diff} を計算し、並進速度の前後進の符号を考慮したうえで、式(11)、(12)に示すように、左右のレバー操作量を決定することとした。

$$\omega_{diff} = \omega_{tgt} - \omega(t) \quad (10)$$

$$lev_R = \begin{cases} 0 & \left(\frac{lev_{base}(t)}{|lev_{base}(t)|} \omega_{diff} < -th_{\omega_{diff}} \right) \\ lev_{base} & (otherwise) \end{cases} \quad (11)$$

$$lev_L = \begin{cases} 0 & \left(\frac{lev_{base}(t)}{|lev_{base}(t)|} \omega_{diff} < th_{\omega_{diff}} \right) \\ lev_{base} & (otherwise) \end{cases} \quad (12)$$

ここでは、レバーの入力値が低い領域における非線形性を回避するため、左右のバランスに関しては、 ω_{diff} が閾値 $th_{\omega_{diff}}$ (rad/s)を超えた際に、 ω_{diff} の方向に角速度の変化が発生するようレバー操作量を選択し、また、左右のレバー操作量は lev_{base} で指定された量で開放、または遮断とした。

6. 走行実験

実機のクローラダンプに対して上記制御系を構築し、3種類の動作に関して走行実験を行った結果を示す。各々の動作の実験目的は、1)軌跡追従制御の動作確認、2)散水作業の実施、3)作業場所からの帰還動作の確認、である。これらの走行実験では、クローラダンプには図-8に示すように、ブルドーザ等で均された路面や振動ローラによって固められたコンクリート路面等の平坦な路面を走行させた。また、本実験で用いた車両側の設定は、オペレータが手動で散水作業を行う際と同一とした。前述の路面上では、オペレータの操縦用コントロー



図-8 クローラダンプの自律走行実験中のモニタ映像の写真

ラのレバー入力値を前進方向または後進方向に最大にした際、車両の最高走行速度は約0.7 m/sであった。また、制御に用いたパラメータを、表-1に示す。

1) 軌跡追従制御の動作確認

構築した軌跡追従制御を用いて、車両の初期位置からある程度離れた直線経路に対する軌跡追従走行を行い、目的の経路へ安定して追従することを確認した。走行経路は、車両の初期位置から1.6 m程度離れた直線経路とし、走行開始時の車両の向きは追従すべき直線の向きにほぼ一致させたときの走行軌跡を図-9に示す。

図-9より、初期位置が追従すべき直線からずれていても、約15 mの走行距離、約35 sで目的の直線に収束し、安定して走行していることが分かる(図-10、図-11)。制御量として出力されたレバー操作量を、図-12に示す。走行開始直後は一時的に左レバーのみを0として、左履帯を停止させて車両の向きを変えるように出力された。その後は、基本的に両レバーとも最大値とし、

表-1 クローラダンプの制御用パラメータ

K_1	0.17
K_2	0.70
C	0.2
v_{tgt}	0.75
$th_{\omega_{diff}}$	0.05

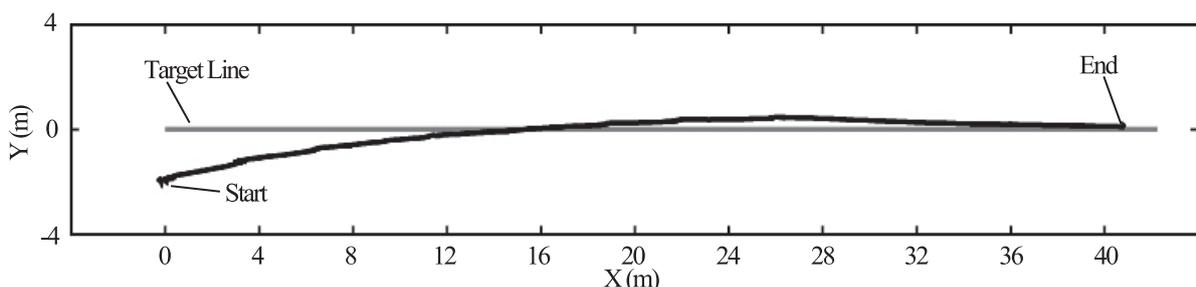


図-9 クローラダンプの自律走行による軌跡。1本の線分に追従走行

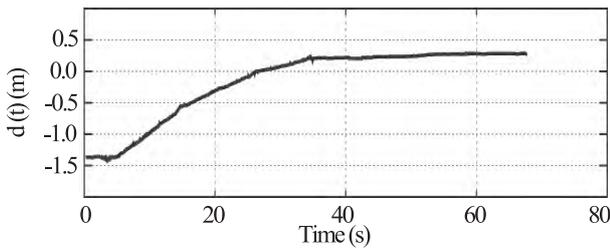


図-10 追従すべき直線と車両の代表位置間の距離偏差

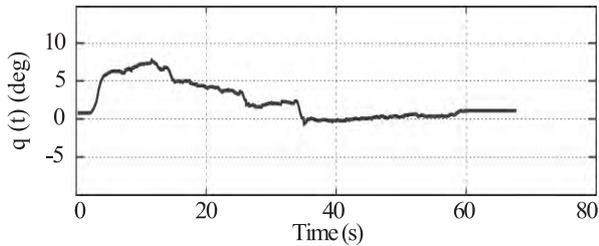


図-11 追従すべき直線に対する車両の相対方位

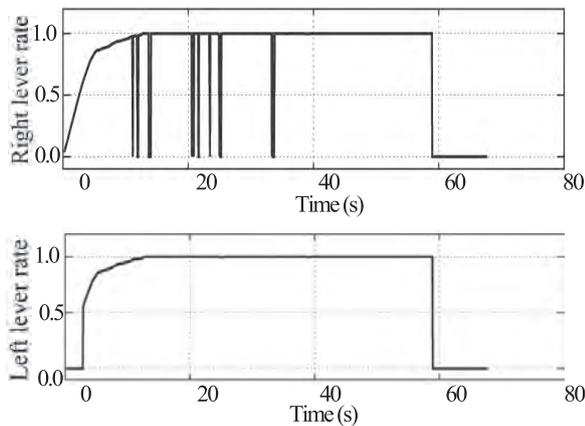


図-12 自律走行システムからのレバー操作量
(上) 右レバー, (下) 左レバー

全速で直進して追従すべき直線に近づくように操作された。その後、車両を徐々に追従すべき直線と車両の向きを合わせるように、間欠的に右レバーを0として、右履帯だけ減速させて旋回が行われている。表-1で示した制御パラメータは、この実験において実機を数回走行させて、著者らが経験的に設定した値である。以降の実験

では、この制御ゲインを用いて実験が行われた。

2) 散水作業

構築したシステムにより散水作業ができることを確認するため、実際の散水作業と同様に、複数の平行に並んだ直線上の経路を往復動作する走行実験を行った。ここでは、散水作業で求められる条件を考慮して、走行経路を0.5mと1.5mの間隔で平行に並ぶ、30m程度の長さの3本の直線とし、直線の追従と次の直線への乗り換えを繰り返す動作を行わせた。走行実験の結果、車両は図-13に示すとおり、目標としていた直線からの誤差50cm以内で3本の直線経路に安定して追従し、散水対象となる路面の範囲を逸脱することなく、対象とした全範囲に散水するよう走行することを確認した。

3) 帰還動作

本研究で構築した自律走行システムが作業現場から待機場所までの帰還に対応できることを確認するため、複数の線分を組み合わせた経路を追従する走行実験を行った。ここでは、逐次的に追従すべき線分を切り替えることで、複雑な経路を走行できることを確認した。走行経路は、モータプールと呼ばれる待機場所から作業を行うエリアまで移動し、その後に帰還する動作を想定し、約120mの経路を設定した。この中では、角度差が小さい直線への乗り換えや、向きが180°異なる直線に対する直線追従を含めた。走行実験の結果、車両は経路を追従でき、向きが180°異なる直線への追従についても、安定して追従できた。走行した車両の軌跡を図-14に示す。

7. 検討と課題

本取り組みでは、実際の無人化施工現場を対象とし、クローラダンプによる散水作業のための重車両の走行制御を自律化する実験を行った。対象とする作業について、実際のオペレータが操作する際の車両側の設定を変えることなく、所望の動作を自律化することができ、既存の無人化施工の枠組みを利用し、いくつかのセンサを

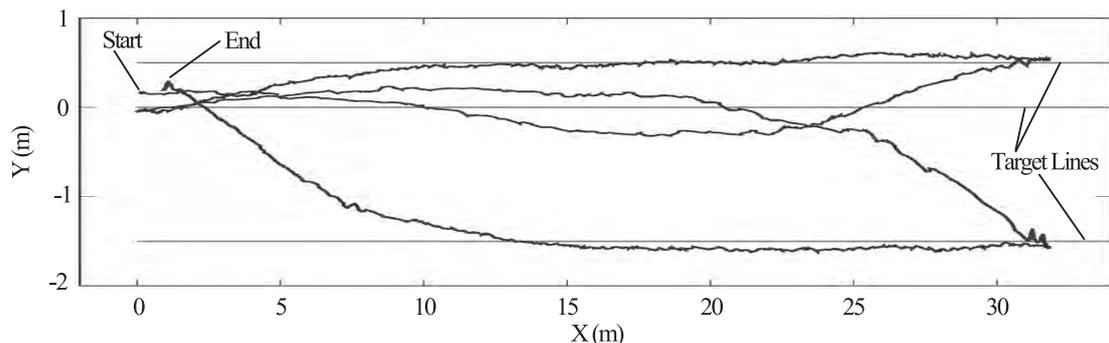


図-13 クローラダンプの自律走行による軌跡。3本の並行に並んだ線分に、真ん中の線分から順番に追従走行。散水作業に必要なとされる走行経路を用いた往復走行実験。

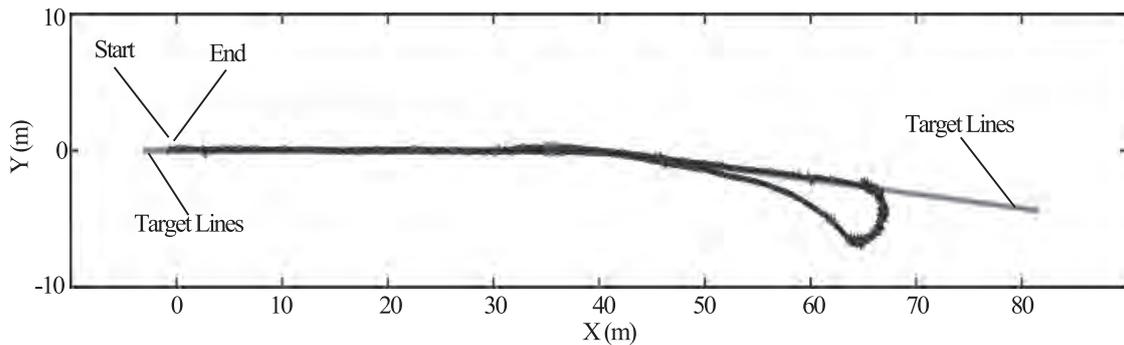


図-14 クローラダンプの自律走行による軌跡。待機場所から作業を行う場所までの移動を想定し、2本の長い線分に沿って追従移動しUターンしてスタート位置へ戻ってくる検証実験

追加で搭載するだけで、車両の走行の自律化が可能であることが確認された。

なお、この実験システムの構築と実験は、雲仙普賢岳の赤松谷11号床固工工事³⁾の現場を対象とし、2014年9月から2015年2月にかけて、複数回の実証実験を行った。本稿では走行実験の結果の一例を示したが、複数の実験において毎回ほぼ同一の走行結果を得られることが確認されている。

一方、クローラダンプの自律走行の実用化のためには、いくつかの課題が残っている。特に、本取組では、散水作業を主な対象とし、車両側の変速ギアやエンジン回転数の設定を両方とも低速に固定した。しかし、車両の高速化のために変速器とエンジン回転数を高速に設定すると、レバー入力と車両の挙動の関係が変化し、現状の制御方法ではフィードバックパラメータの調整が難しく、経路追従制御が安定しないことがある。したがって、今後の車両の高速化のためには、車両や油圧系のダイナミクスや制御の遅れを検討し、車体側の設定に対する特性の解析と制御方法の改良を行う必要がある。

8. おわりに

無人化施工は、重機のオペレータ等の施工従事者の安全を確保する我国特有の技術である。しかし、その技能を有するオペレータの確保が難しいことに加え、オペレータが重機に搭乗して行う通常の工法に比べて作業効率が低く、また、オペレータへの負荷が大きいという問題点が指摘されている。

著者らは、これらの問題を解決する試みの一つとして、現在オペレータが遠隔操作で運転している走行車両である、クローラダンプの走行を、現状の遠隔操作システムと親和性が良く、一部自律化するシステムについて、実験システムを構築し、自律軌跡追従制御の実験を行った。構築した自律走行システムは、実際の無人化施工の現場で遠隔操作のために整備されている通信インフ

ラをそのまま利用し、遠隔操作室から重機本体の走行動作を自律化するものである。このため、実際に無人化施工の現場で使われている機器に大きな変更を加えず、自律運転が実現された。

本稿では、この取組について、実験システムの構成と、重運搬車両の自律走行制御の基礎となる車両の自己位置と方位の測定法と走行制御アルゴリズム、および、各々の操舵メカニズムの異なるクローラダンプの実機への実装方法について述べ、それらの実験の結果や今後の課題について報告した。今後は、継続して、走行させる速度域の拡大や、より広範囲の環境条件の中での安定性の評価や、自律走行性能の向上に向けた制御手法の検討を行う必要があると考えている。

謝辞：本取組と実験の機会を与えて頂いた、国土交通省九州地方整備局、雲仙復興工事事務所および(株)熊谷組の施工現場担当の方々、ならびに自律走行の基本技術を提供頂いた筑波大学知能ロボット研究室に深く感謝する。

参考文献

- 1) 無人施工協会 無人化施工システムの構成: http://www.kenmukyou.gr.jp/f_souti.htm
- 2) 国土交通省九州地方整備局 雲仙復興工事事務所: <http://www.qsr.mlit.go.jp/unzen/index.html>
- 3) 供田英一, 岩崎肇, 岡本仁: “赤松谷川9号床固工工事における無人化施工”, 日本建設機械化協会, 建設の施工企画, no.726, pp.14-20, 2010.
- 4) 茂木正晴, 藤野健一, 油田信一: “無人化施工におけるヒューマンインターフェースの作業効率評価”, 日本ロボット学会誌, vol.33, no.6, pp.429-426, 2015.
- 5) 古屋弘, 栗生暢雄, 清水千春: “3D画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施工システム」”, 大林組技術研究所報, no.76, pp.1-10, 2012.
- 6) 山元弘, 茂木正晴, 大槻崇, 柳沢雄二, 野末晃, 山口崇, 油田信一: “動作計画と制御に3次元情報を用いた自律油圧ショベルプロトタイプの開発”, 計測自動制御学会論文集, vol.48, no.8, pp.488-497, 2012.
- 7) 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允: “リモートブレイン方式におけるソフトウェアプラットフォームの構造化と実現”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.4, pp.550-556, 1997.
- 8) S. Yuta, Y. Kanayama: “An implementation of MICHII - A Locomotion Command System for Intelligent Mobile Robot -”, in Proc. of International Conference on Advanced Robotics, pp. 127-

- 134, 1985.
- 9) S. Iida, S. Yuta : "Control of Vehicle with Power Wheeled Steerings Using Feed-forward Dynamics Compensation", in Proc. of Annual Conference on the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2264-2269, 1991.
- 10) 坪内孝司 : "車輪移動体の制御", 日本ロボット学会主催第 43 回講習会ロボット工学入門シリーズ〈移動技術編〉『移動ロボットのやさしい解説』, pp. 58-68, 1995.
- 11) 金井喜美雄 他 : "ビークル", コロナ社, 2003.
- 12) 竹内栄二郎, 坪内孝司 : "異種複数センサに対応した移動ロボット用ナビゲーションソフトウェアの公開", ロボティクスメカトロニクス講演会講演概要集 2008, 1P1E22 (1) -1P1-E22 (4), 2008.
- (2018.12.11 受付, 2019.5.14 採用決定)

Development and Experiments on Autonomous Driving System for Crawler Dumper for Unmanned Construction

Shigeru BANDO¹, Tadahiro HASEGAWA², Shin'ichi YUTA³ and Shigeo KITAHARA⁴

¹ Technical Leader, Doog Inc.

² Professor, Department of Electrical Engineering, Shibaura Institute of Technology

³ Visiting Professor, SIT Research Laboratories, Shibaura Institute of Technology

⁴ Head, ICT Promotion Office, Kumagai Gumi Co., Ltd.

In this paper, we report our work on the implementation of autonomous driving system in the existing unmanned construction equipment and the result of real-world experiment. Our system can be incorporated into the existing unmanned construction machinery with only minor modifications because it fully utilizes the remote-control function that already exist. In the real-world experiment, the crawler dump trucks were equipped with our system and its autonomous driving operation was examined in the actual unmanned construction site.