

## 8. 建設機械の自律化に関する研究 (自律作業の研究)

大成建設株：宮崎 裕道，\*近藤 高弘

### 1. はじめに

現在主に使用されている建設ロボット等は、特定な作業を決められた通りに動作する自動化機械である。このような機械では予め作業パターンが設定されていてパターン化した作業を実行する能力しか持っていない。このパターンを実際の作業に合わせて、その都度組み変える必要がある。

このようなやり方では作業の変更に手間取り、想定された作業動作以外は機械が対応できないなどの問題がある。

建設作業の自動化を図る上で建設機械自身が事態に対応して自己判断できることが好ましい。このような問題を解決するアプローチの一つとして建設機械の自律化に関する研究に取り組んできた。

理想的には人間の直接的操作を全く介すことなく建設機械自らが自律的に移動・作業を行う未来的なロボットの研究である。その様なロボットが経済コストの範囲内で検討され開発できれば人間の操作を

必要としない無人で働く建設機械ができることになり、社会に与える影響も十分大きく多大な効果が期待できるものと考えられる。また、このようなロボットは作業効率を向上させ、人間が行う危険作業を回避することができる。すなわち生産性を向上させるための投資と人命尊重のための投資の両方を包含することができる。

平成9年度建設機械と施工法シンポジウムに自律走行に関する研究内容を発表した。今回は自律走行の続きとして自律作業に関する研究成果を発表する。



写真1 自律式トラクターショベル

### 2. 研究内容の来歴

平成6年度：三軸光ファイバージャイロを使用して慣性航法の基礎実験を実施。

平成7年度：慣性航法の精度を高めるため、三軸リングレーザージャイロを使用した基礎実験を実施  
実機のトラクターショベルのサーボ化および無線操縦化を行った。

平成8年度：高精度の慣性航法を経済的に実現するため一軸光ファイバージャイロと地磁気センサーによる慣性航法を実現し、障害物回避を含む完全無人操作による自律走行の実験を実施。

平成9年度：土砂の荷取りとダンプへの荷積み完全無人化した自律作業実験を実施。

### 3. 概要

建設機械を自律化させる研究では、まず機械自らの位置と姿勢を検知する方法として、自律走行機械の活動エリアを限定せず構造物の内部でも位置・姿勢が検知でき、かつ初期値のみの入力でも位置・姿勢が把握できる慣性航法を選択した。

また事前に計画された路線を走行していてもルート上に障害が発生することを想定し、自律走行時に迂回機能を持たせる事を前提とした。

土砂の荷取りや荷積み作業では、周囲の状況を認識してルートの決定を自ら設定できることとした。建設機械を自律化させるために必要な研究要素として以下の研究内容を設定した。

- ①. 機械の現在位置・姿勢を検知する技術の研究
- ②. 建設機械の自律走行を制御するためのアルゴリズムの研究
- ③. 緊急時に対応した建設機械の自己判断機能の研究
- ④. 各装置を有機的に結合し暴走などを未然に阻止するための電子制御技術の研究
- ⑤. 前方方向の地形認知技術の研究
- ⑥. 自律作業のため周囲の状況を認識して判断制御するためのアルゴリズムの研究
- ⑦. 上記研究内容をフィールド走行実験で検証

以上の内容を実証実験した。3 ton 級トラクターショベルを用いて自動走行（障害物回避を含む）、自動作業（荷取り・荷積み）を人間の直接操作を介さず機械自ら判断する自動制御が可能になった。

### 4. 研究内容

土砂の荷取り・荷積み作業の自律化に必要な研究内容を以下に示す。

- ①. 荷取り・荷積みエリアでのコース設定はトラクターショベル自ら行う。
  - ②. 荷積み用ダンプの停止位置が何処であっても対応できる。
  - ③. 荷取り時スリップなどで慣性航法の座標ズレをマーカボールを用いて補正する。
- 以上の内容を実験検証する。

今回は荷取り・荷積みを自動化する自律作業の研究が主内容である。そのためシステム全体の構成は、新たにレーダーPCがSHUBに接続されることになった。

また荷積みするダンプトラックも完全自律走行が可能な自動機械であると想定し、ダンプとトラクターショベルは互いに位置情報を交換しながら協調して土砂の荷取り・荷積み作業を行った。

通信 STD：外部との通信および内部通信の分配を制御する。

制御 STD：建設機械の操作部（アクセル、シフト等）を指示値通りに制御する。

監視 PC：建設機械をどのように操作するかを指示値を制御する。

慣性 PC：自律走行の計画路線の指示と慣性航法による座標処理を制御する。

レーダーPC：地形形状の探査および障害物の探査を制御する。

SHUB：各サブシステム間のデータ蓄積型通信ネットワークシステム。

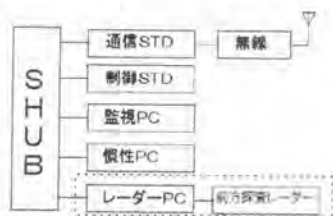


図1 自律システムの構成

#### 4-1. レーダPC

前方探査レーダーはレーザ距離計を内装しており、前方左右方向 $\pm 90^\circ$ 、上下方向に $\pm 45^\circ$ の探査エリア能力を持ち80m先の探査物体までの距離を $\pm 1\text{cm}$ の精度で三次元的に探査することができる装置である。

この探査レーダーによって入手される情報は、探査装置の設置位置を原点としたローカル座標系での三次元座標データの集合となる。しかし計測時トラクターショベルのピッチングおよびローリングの傾斜影響をうけ、計測データをグランドレベルの水平面とするように座標変換を行う必要がある。

即ちXY平面のピッチング・ローリングの補正式は

ローリング角：(y軸正方向に右ねじ回り(正))

ピッチング角：(x軸正方向に右ねじ回り(正))

とすると

以下はローリング角の補正式

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \tan \theta_y \cdot \cos \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \sec \theta_y - \tan \theta_y \cdot \sin \theta_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

以下はピッチング角の補正式

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\tan \theta_x \cdot \cos \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \sec \theta_x - \tan \theta_x \cdot \sin \theta_x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

この式により三次元座標の補正を行なう。探査レーダ装置でダンプトラックを探査したときの三次元探査結果を図2に示す。

実際に必要な情報はこの三次元データから探査内容別に抽出する。

ダンプ探査の情報：ダンプの両端の座標値と荷台のある位置

砂山探査の情報：砂山の頂点座標と荷取り時進入点座標(砂山の稜線座標)

図3に砂山探査を行いXY平面のコンター図に変換し、点P(砂山頂点)および点A(荷取り進入点)の座標を抽出した様子を示す。



写真2 レーダー探査装置

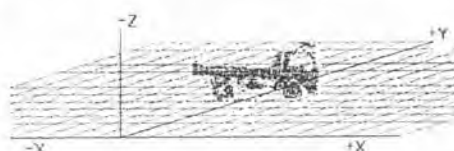


図2 レーダー探査したダンプの三次元イメージ

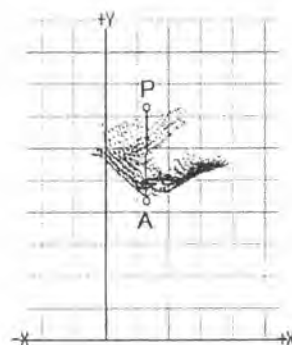


図3 砂山探査情報の抽出結果

#### 4-2. 荷取り・荷積み位置の決定

通常の自律走行ではコースを設定してそのコース上を走行するように制御されている。

自律的に荷取り・荷積みを行う場合、荷取りの砂山位置および積み込みダンプの停止位置が決定するまでは事前にコースを設定することはできない。

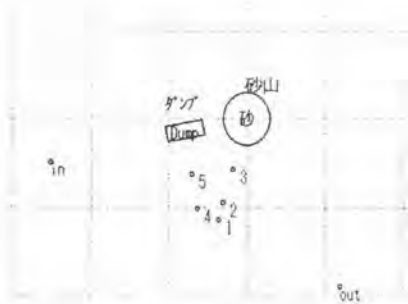


図4 荷取り・荷積み位置の決定



写真3 マーカーポールと砂山

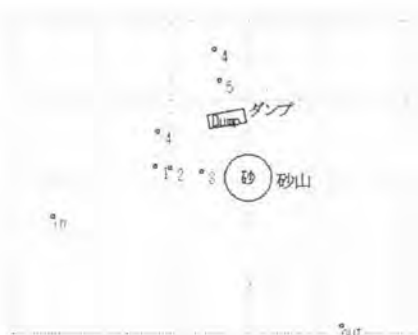


図5 迂回のある荷積みルート

する。点4でダンプ位置をレーダー探査してダンプの荷台の位置を決定し、ダンプ側面に垂直になる様な最適アプローチ位置点5を再計算し進入方向を決定する。

実際に荷積みアプローチ位置点5に移動する場合、トラクターショベルは方向と位置が適切になるまで再トライを行う。

点5で最適なポジションを確認して、ダンプまでの距離を計測しながら前進して最終的にダンプに荷積み作業を実施する。荷積み累積がダンプ積載量以上になれば、点1まで後進してout点へ走行して正規の設定コースに戻る。

積載量が満たない場合、再度点1まで後進して、同様に砂山アプローチを繰り返す。

コース設定はダンプが積み込みエリアに進入して停止し、その停止位置情報をトラクターショベルに連絡してきたときにはじめて決定することができる。そのため荷取り位置に近づいたトラクターショベルはダンプ停止位置情報をもとに自ら荷取り・荷積みに必要な走行ルートを決める必要がある。

図4に示すように荷取り位置に近づいたトラクターショベルの最初の通過点1を決定する。点1は荷取り・荷積みを繰り返して行っても互いの作業領域を侵さない点を求める。

全体のコース設定は、まず作業エリアin点を通過後、点1に進み、点1から砂山までは点2、点3の位置設定を仮定する。

点2で砂山位置をレーダー探査して最適アプローチ位置、点3と進入方向を再計算する。点3は図3に示すように砂山の稜線方向に沿って設定される。

コースを再構築して最終的に砂山にアプローチし荷取り作業を実施する。

荷取り作業を行うと荷取り負荷により駆動輪のスリップが発生する。このスリップ量は慣性航法の位置計算に大きな誤差を生じ、後の荷積み作業での位置決定にも影響を与える。

そこで荷取り後、トラクターショベルは荷取り重量を計算して荷取り量を把握すると同時に、砂山後部に設置されている、マーカーポールの位置をレーダー探査で計測する。

このマーカーポールを計測することで自らの位置および方位角を補正することができる。

その後トラクターショベルは点1まで後進して行く。

同様に点1からダンプまでは点4、点5の位置設定を仮定

またダンプと砂山の位置関係によっては、荷取り後点1に戻り点4に向かう場合、ダンプ自身が障害となって直線的に移動ができない場合がある。この様な場合は図5に示すように、点4の迂回点を発生させ回避させるようなルートアルゴリズムになっている。

#### 4-3. マーカボールによる位置補正

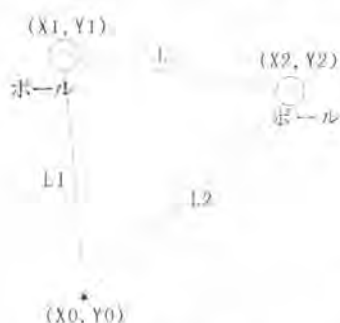


図6 マーカボール探索による慣性座標補正

とする。

マーカボールのレーダー探査座標を $(lx_1, ly_1)$ および $(lx_2, ly_2)$ とする。ただしレーダー探査装置を原点座標とする。

計測座標より各ボールまでの距離を $L1$ および $L2$ とする。

$$\begin{cases} L1^2 = (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \\ L2^2 = (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 \end{cases} \text{より修正慣性座標を}(x_0, y_0)\text{求める}$$

修正方位角 $Hh$ は以下の式により求められる。

$$Hh = Hp - \left( \tan^{-1} \left( \frac{ly_2 - ly_1}{lx_2 - lx_1} \right) + 90 \right)$$

以上の修正方法はマーカボールの設置位置および大きさ、計測位置の関係で精度は変化する。

フィールド実験では慣性座標の補正結果は

位置座標の補正精度は $\pm 30$  cm、方位角精度の補正は $\pm 1^\circ$  を得ることができた。

#### 5. 自律作業実験結果

自律作業の検証をフィールドで実験を行った。

実験は、まず従来のように設定コースを決め、コース上に土砂の荷取り・荷積み作業を含めた。コースには障害物を設置して障害物回避走行を行わせた。荷取り・荷積みの作業エリアのコースはトラクターショベル自身がダンプ位置情報（座標値、方位角）を入手して自らコースを決定して自律操作されている。

これらの一連の研究実験で、トラクターショベルの走行および作業に関して完全自律化が達成できた。

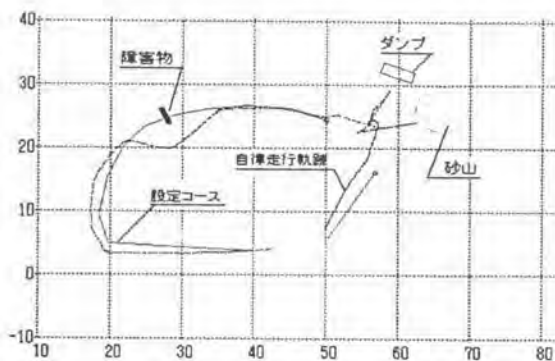


図7 フィールド実験の走行軌跡

図7に障害物回避をして土砂の荷取り・荷積み作業の一連を実施した時の走行軌跡を示す。

この結果からより高速に情報を処理し、操作系のレスポンスを向上させ、システム全体の完成度を増すことで完全自律型建設機械の実用化は可能な域にあると考えている。

## 6. おわりに

研究に際して自律ロボットのコンピュータシミュレーションやミニチュアロボットなどの実験で終わらず、実機（3 ton級トラクターショベル）を用いて自律制御実験ができたことは、今後各種の建設機械を自律化する上で貴重なデータが得られた。

このような自律制御系の機械は、ラジコン操作や、パターン操作のような動きとは違い、同じ動きの反復動作や人間の判断を介入するような操作を伴わない。完全に独立した制御系をもっている。そのため従来では不可能だった24時間連続作業や、無線の届かない場所や、危険で周囲の状況を判断しながら行動しなくてはならない自動機械には大いに有効となる。

この技術の発展のためには分野を越えた知恵とアイデアが必要で、また多くの方々のアドバイスをいただきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 宮崎裕道・近藤高弘：建設機械の自律走行に関する研，平成9年度、建設機械と施工法シンポジウム論文集、(社)日本建設機械化協会
- 2) 宮崎裕道・近藤高弘：建設機械の自律化に関する研究、建設機械 '98 6 400. Vol. 34. No. 6、日本工業出版
- 3) 宮崎裕道・近藤高弘：建設機械の自律化に関する研究、第7回建設ロボットシンポジウム論文集、(社)土木学会、(社)日本建築学会、(財)先端間接技術センター、(社)日本建設機械化協会、(社)日本ロボット学会、(社)日本ロボット工業会 共催