

1. 放射線環境下における建設機械の自動運転システム

鹿島建設(株) ○ 三浦 悟
黒沼 出
浜本 研一

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の原子炉建屋解体・がれき撤去工事で発生する高線量がれきの構内保管施設への搬送作業は、これまで遠隔操作型や放射線遮蔽型の建設機械を導入することで、搬送作業時の被ばく線量低減が行われてきた。しかし、現地での作業環境は依然厳しく、より一層の被ばく低減と作業効率の向上、遠隔操縦等で問題となるオペレータの誤操作を無くすための改善は常に追い求めて行かなければならない課題であった。これに対し搬送作業に用いられるクローラダンプおよびフォークリフトの走行機能を自動化する検討を進めた結果、最新の計測技術、制御技術を適用して、障害物や経路を自律的に認識、判断しながら既設走路上を自動で走行するシステムを開発し、実作業に適用するに至った¹⁾。

2. 搬送作業について

高線量がれきの構内保管施設への搬送作業は、建屋解体場所で高線量がれきを鋼製コンテナに積み込み、構内保管施設まで運び、保管施設のコンテナ貯蔵場所に荷下ろしを行う(図-1)。この搬送作業は、2種類の建設機械を用いて行われており、そのうちの各機械の走行を対象に自動化を検討した。

a. クローラダンプ

原子炉建屋から構内保管施設まで鋼製コンテナを屋外搬送する(図-1 上側、走行距離は約 1km)。

b. フォークリフト

構内保管施設の外で鋼製コンテナを受け取り、施設内地下に格納する(図-1 下側、走行距離約 800m)

3. クローラダンプ自律走行システム

3.1 導入目的

従来の屋外搬送は、図-2 の配置で、オペレータが先導車の後部に遠隔操作型クローラダンプ(車両重量 16.4 t, 最大積載荷重 11t, 車両全長 6.0m, 車両全幅 3.5m)と対面するように後ろ向きに搭乗し、遠隔操作によって運転していた。作業中の被ばく線量を抑えるために、クローラダンプからできるだけ離れた位置から操作してするのだが、狭隘な場所では機体の周囲状況などを目視で確認す

るため、クローラダンプに近づいて操作しなければならない状況も生じていた。そこで、被ばく線量低減のために一定以上の距離を保つとともに、作業効率の向上、オペレータによる誤操作防止を目的に、自律走行システムの開発を行った。

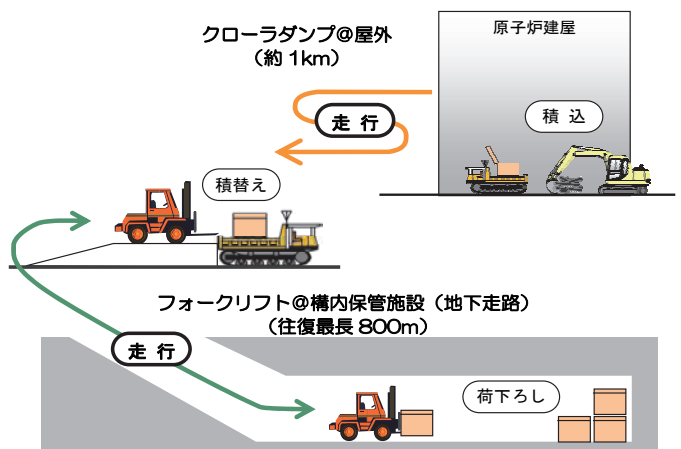


図-1 搬送システムの概要



図-2 従来のクローラダンプによる搬送作業

3.2 システム概要

図-3 に自律走行に必要な各種センサ、制御機器、及び通信機器を設置したクローラダンプの外観を記す。主な機器の種類と用途は以下の通りである。

・センサ機器

- ー RTK-GPS：機体位置計測
- ー GPS 方位計：機体方位計測
- ー ジャイロ・加速度センサ：機体位置と機体姿勢計測の補間
- ー レーザスキャナ（2 箇所）：前方、側部の障害物検知、安全監視
- ー 車載カメラ（5 箇所）：周囲状況・安全確認

・制御機器：自律走行制御用コンピュータ

- ・通信機器：RTK-GPS 補正データ通信用無線、センサ・システムのモニタ用無線 LAN



図-3 クローラダンプ外観



図-4 監視・指示システム（先導車内）

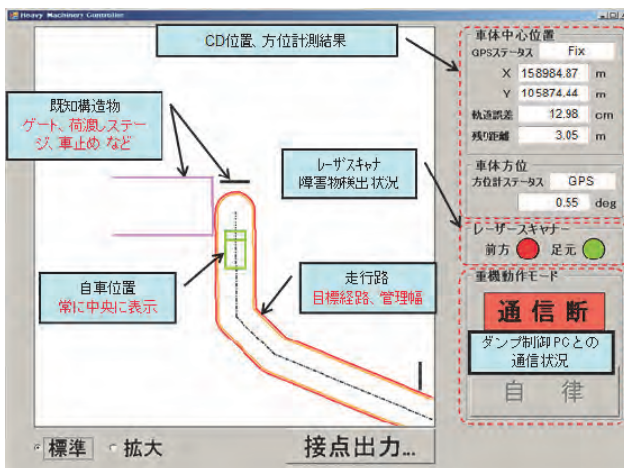


図-5 自動運転状況のモニタ画面

なお、RTK-GPS 並びに GPS 方位計を用いているため、機体の絶対位置、絶対方位の計測頻度は 10Hz であった。本システムでは、自律走行時の安全性・安定性を確保するため、これらのデータをジャイロ・加速度センサによって補間し、高速 (100Hz) で出力できるように改良して用いている。

クローラダンプは先導車のオペレータからの指示により、後述する走行制御ステップに従って自律走行を開始する。目標経路に対する機体の位置、

方位、障害物検出状況、及び車載カメラの映像は、無線 LAN を通じてリアルタイムに先導車に送信され、モニタや PC 画面上へ表示される (図-4, 5)。自律走行中は計測データや映像を監視するだけとなりオペレータが機体に接近する必要はなくなる。

3.3 走行制御方法

クローラダンプが目標経路に追従して走行するための制御方法について図-6 を用いて説明する。予め現地測量により目標経路を設定する (目標経路の折れ点部を中継点、最終端を最終目標点と呼ぶ)。また、機体位置と目標経路からの離隔 (追従誤差と呼ぶ) に対し、走路の状況・幅に応じた各区間の管理幅及び限界幅を設定する。事前準備をした後、次の制御ステップで走行制御を行う。

Step 1) 目標経路上に設定したクローラダンプの前方直近にある中継点を目標点として設定する

Step 2) 目標点の方向に機体の向きを合わせる

Step 3) 直進走行する。走行中に、

Case1: 追従誤差が管理幅に達した ⇒ Step 2 へ

Case2: 追従誤差が管理幅を超えた or 障害物を検知、接触可能性あり ⇒ 非常停止し、カメラ等で確認 ⇒ 遠隔操作に切替えて運転する

Case3: 中継点に到達した ⇒ 次の中継点を目標点に設定し、Step 2 へ

Case4: 最終目標点に到達した ⇒ 停止

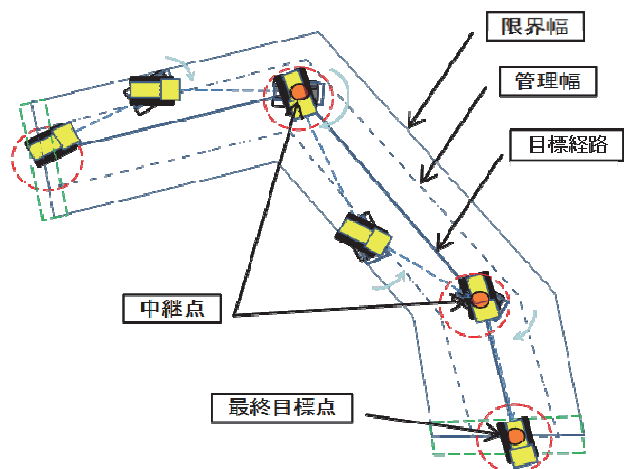


図-6 走行制御のイメージ

3.4 導入効果

自律走行中は、オペレータは計測データモニタ・車載カメラ監視により、クローラダンプの走行状況を直接目視で確認することが不要となり、従来は 30m 弱だった離隔距離を 100m 程度まで離すことができ、オペレータの被ばく線量を大幅に低減させることができた。さらに誤操作の恐れもなく、運転熟練度の違いによる作業時間のバラツキを抑制することが可能となった。

4. フォークリフト自律走行システム

4.1 導入目的

高線量がれきが搭載された鋼製コンテナを構内保管施設に搬送、定置する作業には、遠隔操作型フォークリフト（図-7：車両重量 16.4t，定格荷重 8.5t，車両全長 6.3m，車両全幅 2.4m，最少旋回半径 4.1m）が採用されたが、狭い屋内通路での搬送作業のため、オペレータの誤操作及び作業効率の低さが懸念されていた。そこで安全性を確保しつつ、搬送作業の目標サイクルタイムを確保する対策として、自律走行システムを開発した。



図-7 フォークリフト全景

4.2 システムの特徴

本システムの特徴として、GPS が使えない屋内での車体位置計測にレーザスキャナによる自己位置認識技術を採用したことがある。製造工場等で実績のある電磁誘導方式では走行路に誘導線を埋設する工事が必要であり、走行ルートにも制限があるため、本件への適用は困難であった。そこで、事前工事が不要かつ走行路の変更に伴う構造物や機械等への工事・改造が不要であるレーザスキャナによる位置・姿勢角計測方法を開発し適用した。

4.3 システム概要

クローラダンプで運んだ鋼製コンテナをフォークリフトに積替え、構内保管施設内に定置する作業の内、コンテナの積替え・定置はオペレータが遠隔操作で行い、それ以外の斜路の上り下り、直線・切返し部の走行を自動化した。なお、保管施設の走路は、壁面設備を考慮するとフォークリフト車両幅に対し左右約 1.0m の余裕幅であった。

保管施設には有線及び無線による LAN を構築し、運転操作は施設から約 500m 離れた建物内の遠隔オペレータ室から行うことができる（図-8）。遠隔操作システムと自律走行システムの構成を図-9 に示す。図-9 の左側に遠隔オペレータ室内に設置している機器の機能を、図-9 の右側にフォークリフトの車体キャビン内に設置している機器の機能を示している。それぞれの機器は LAN を通じて通信している。また図-9 の下側を破線で囲んだ部分が遠隔操作システムであり、図-9 の上側が開発し



図-8 遠隔オペレータ室

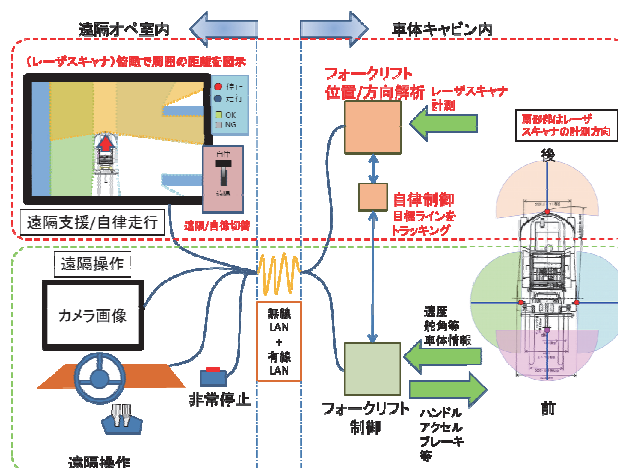


図-9 遠隔操作・自律走行システムの構成

た自律走行システムである。

4.4 レーザスキャナによる位置・姿勢角計測方法

レーザスキャナには SICK 社製 LMS111 を採用した。本センサは 270 度（正面より左右 135 度）の範囲を 0.5 度毎に 25Hz のサンプリング周期で計測することができる（図-10）。

本システムでは、パーティクル・フィルタを用いてフォークリフトの施設内での相対位置や姿勢角を推定している²⁾。まず、フォークリフトのステアリング角度及び速度データを基に車両の確率的な運動モデルを用いて各パーティクルの推定位置・姿勢角及びその推定確率を求める。得られた推定位置・姿勢角に対し、レーザスキャナ計測データ（図-11 左）を施設内の壁に反射して得られたものと考え、CAD 図面などの事前に得られた構造物形状から作成した 2 次元地図データとの照合確率を求める。位置・姿勢角の推定確率とレーザスキャナ計測データの照合確率から各パーティクルの適合確率を求め、フォークリフトの施設内での相対位置・姿勢角を全パーティクルの期待値として推定している（図-11 右）。

相対位置・姿勢角を推定するサイクルタイムは 0.05 秒以内であり、フォークリフトの動特性に対して、十分リアルタイムな推定をすることができ

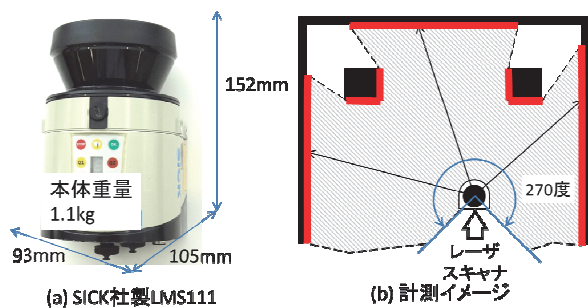


図-10 レーザスキャナ諸元と計測イメージ

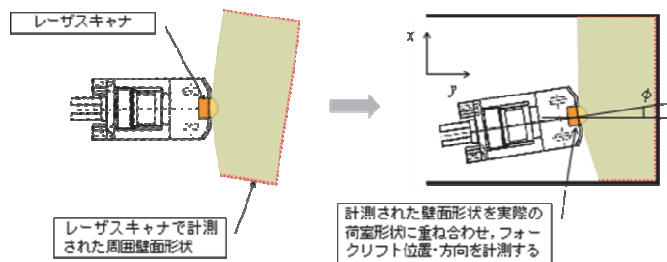


図-11 相対位置・姿勢角の推定

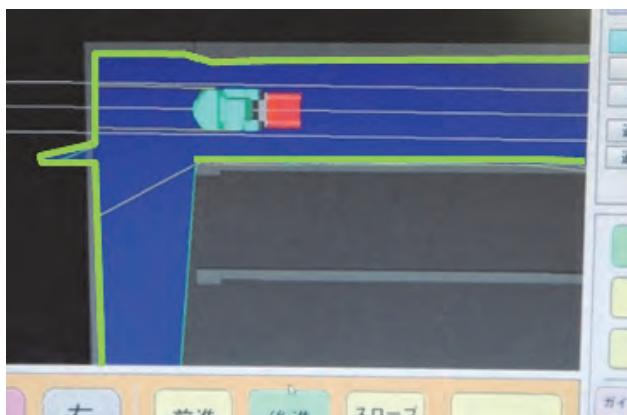


図-12 施設内走路内の CG 画面

る。本システムではレーザスキャナを機体の前後左右の 4 か所に配置し、位置・姿勢角計測及び障害物の検知を行っている。

図-12 は施設内通路を走行している機体を、レーザスキャナデータから推定した位置・姿勢角計測結果を基に描いた CG 画面を示す。灰色の濃淡は施設の床と壁を表し、青色領域はレーザスキャナの計測範囲で、緑線は計測された形状である。事前に施設の床と壁を地図化して与え、パーティクル・フィルタで得られた位置・姿勢角を基に機体とレーザスキャナ計測データを描いているが、レーザスキャナ計測データと施設内の壁の位置が一致しており、相対位置・姿勢角を正しく推定していることが分かる。

4.5 走行制御方法

制御サイクルタイムは、位置・姿勢角計測のサイクルタイムから約 0.05 秒である。ハンドル角指

令値は、フォークリフトの相対位置・姿勢角を計測後、予め定めた目標ラインからの誤差変位および誤差方向を求め、フォークリフトが追従するように PI 制御を用いて計算している（図-13）。走行速度はスロープ部上り・下り、直線部及び切返し部のそれぞれに対して速度指令値を設定し、指令値を切換えて制御している（作業サイクルタイム等から平均走行速度は約 2km/h である）。

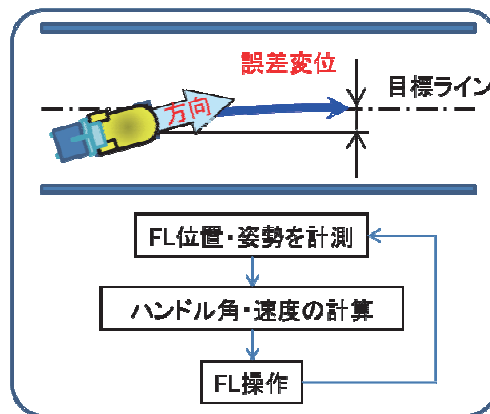


図-13 走行制御概要

4.6 導入効果

高線量がれきを抱えた状態での狭隘部の走行、方向変換を遠隔操縦で行うことは、オペレータにとって緊張感を維持させなければならない過酷な作業であったが、それを自動化したことで、クローラダンプ自律走行システムと同様に、本システム導入の結果、オペレータの熟練度に関係なく一定時間で搬送作業工程を完了できるようになったとともに、コンテナの積替え・定置に専念することが出来るようになり、負担低減が図れた。

5. おわりに

本報告では、東電福島での高線量がれき搬送システムにおいて開発したクローラダンプ自律走行システムとフォークリフト自律走行システムの目的、構成機器及び導入した自律走行機能について概説した。本開発システムは、被ばく線量低減だけでなく、緊迫した状況下での遠隔操作におけるオペレータの心理的疲労を軽減し、誤操作を無くし安全性を高めることを目指して導入した。本システム適用の効果については現在搬送作業を進める中で確認していく予定である。

参考文献

- [1] 三浦悟，日比康生：放射線環境下における搬送作業の自動化，土木施工，Vol. 54, No.1, pp.52 - 55, 2013
- [2] S. Thompson et.al: Constrained 6DOF Localization for Autonomous Navigation of a Golf Cart, ロボティクス・メカトロニクス講演会2013講演論文集, pp.1A2 - 103 (1) - (4), 茨城県つくば市, May, 2013