

ごみクレーン全自動化への取組み ～ごみピット3D計測技術の開発～

Development Work for a Fully Automatic Refuse Crane —Three-Dimensional Measurement of Refuse Pit—



眞野文宏*
Fumihiko Mano



上村祥平**
Shohei Uemura



渡邊 圭*
Kei Watanabe



伊藤 正***
Tadashi Ito



江口 徹****
Toru Eguchi
博士 (工学)

将来的な労働人口減少リスクに対するごみ焼却施設の運転省力化・自動化の一方策として、当社では「ごみクレーン全自動化」を推進している。その要素技術の一つとして、ごみピット内に貯留しているごみ高さ情報を、複数の測距センサを用いてリアルタイムかつ高精度に計測する技術を開発した。測距センサには、レーザ方式と両眼ステレオ方式の異なる方式の組み合わせ手法を採用した。クレーンバケットやごみ山の影など計測の死角領域には独自の補正処理を行い、ごみピット全面を安定して計測できることを確認した。

We are trying to realize a “Fully Automatic Refuse Crane (FARC)” for incineration plants as a labor-saving solution to likely future decreases in the working population. As an elemental technology, we have developed a way to accurately measure the height of waste in the refuse pit in real-time using several range sensors. The range sensors combine laser and binocular stereo principles into an original detection system. The system is additionally equipped with original corrective processing for dead-angle areas behind the crane bucket and piled waste, thus it is proven to assuredly measure the whole surface of the waste in the pit.

Key Words :

ごみ焼却施設	Incineration Plant
ごみクレーン	Refuse Crane
自動運転	Automatic Operation
3D計測	Three-dimensional Measurement

【セールスポイント】

- ・運転員の熟練度合によるごみ攪拌操作の格差がなくなり、安定操業が図れる。
- ・省人化によるLCC低減が図れる。

まえがき

少子高齢化に伴う労働人口の減少、地方財源の縮小などの社会環境の変化を背景に、近年ごみ焼却をはじめとする施設においてDBO（Design, Build and Operation）による長期包括案件が増加している。また一昨年環境省からは「持続可能な適正処理の確保

に向けたごみ処理の広域化およびごみ処理施設の集約化について」の通知が発表され、今後も広域化・集約化が進められる中で受注競争が激化していくことが予測される。これらを背景に、廃棄物処理事業においてはさらなる運営の効率化が課題となっている。

具体的には、労働人口の減少において、熟練運転員の確保が困難となっており、省力化・自動化が求められている。また長期包括案件の増加では、さらなるLCC（Life Cycle Cost）低減が求められている。これらを解決する手段として、近年IoT/AI技術を活用した自動化による省力化への取組みが活発になっている。

ごみ焼却施設の操業には、各所で人手の関わる作業があるが、その1つに安定燃焼に影響するごみピットでの攪拌や積替え、給じん装置への投入等のクレーンワークがあり、従来よりこれらは熟練運転員の操作に依存している。ごみクレーンの自動運転機能には、クレーンメーカーが提供する機能もあるが、量や性状が変動する家庭ごみを対象とするごみクレーンでは、しばしば使用できない状況が発生する。例えば、ごみ搬入の多い時間帯では最適なごみ攪拌状態が維持できない状況が発生するため、クレーン運転員を確保しなければならない状況にある。

この課題に対し当社では、(株)神戸製鋼所と共同でごみクレーンの完全自動化を目指し、2018年より技術開発に着手した。本報では開発中のごみクレーン全自動運転システムの概要および、その要素技術の一つであるごみピット3D計測技術の詳細について述べる。

1. ごみクレーン全自動運転システムの概要

当社の目指すごみクレーン全自動化システムの全体像は図1に示すとおりである。熟練運転員の操作技術と同システム上で再現するために、「認識」、「判断」、「操作」の観点で機能要件を整理した。

(1) 認識機能

運転員の視覚情報から把握されるごみの堆積状況や攪拌状況を認識する機能であり、これには図1①のごみピット3D計測機能や画像認識技術による②のごみ種識別機能を活用する。

(2) 判断機能

認識機能で得たごみ情報などからその時点で最適な操作（攪拌／積替／投入）を選択し、バケット移動先の目標地点を決定する（③クレーン動作計画機能）。

(3) 操作機能

動作計画機能が決定した目標地点へ向けて、現状のマニュアル運転と同水準の高速かつ正確なバケット動作を実現する（④高速化制御機能）。

現在、早期技術確立を目標に上記の各機能の開発を並行して進めているが、本稿では認識機能の一つを構成するごみピット3D計測技術について、次節以降で詳しく紹介する。

2. ごみピット3D計測技術

従来のごみ高さ計測は、ごみ積替えや攪拌作業時にクレーンバケットがごみ面に到達する時の高さ情報で都度更新することで表現していたが、ごみ搬入や積替え作業などの外乱により多くの領域ではリアルタイムにごみ高さを正確に把握できていなかった。また測距センサを用いる計測では、クレーンバケットやごみ山の影となる死角領域の精度が課題であったが、今回これらを解決する独自技術（ごみピット3D計測技術¹⁾）を開発した。

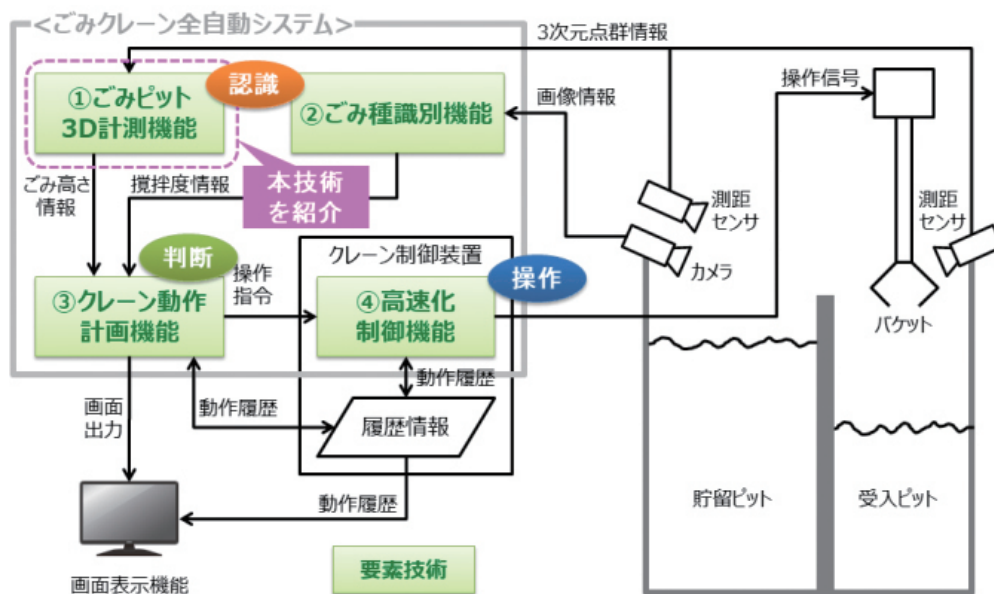


図1 ごみクレーン全自動化の全体像

2.1 ごみピット3D計測の機器構成

ごみピット3D計測を達成するための機器構成の模式図を図2に示す。開発技術ではごみピットの壁面上に測距センサを設置して3D計測を行うが、測距センサ1台では、クレーンがごみ面よりも手前に存在する場合、それが障害物となり正確なごみ高さを取得できない可能性がある。そこで本技術では測距センサを2台使用し、互いを対向させて設置する構成とした。これにより死角なくごみピット全面のごみ高さを計測できる効果が期待される。

測距センサの測定方式(図3)は、1台がレーザー方式、1台が両眼ステレオ方式である。レーザー方式の測距センサは、2D計測が可能な測量センサと回転ステージを組合わせたものである。また両眼ステレオ方式の測距センサは、市販の産業用カメラ2台を組合わせることによるステレオカメラを採用した。

2.2 ステレオカメラのキャリブレーション

ステレオカメラのキャリブレーションでは、チェ

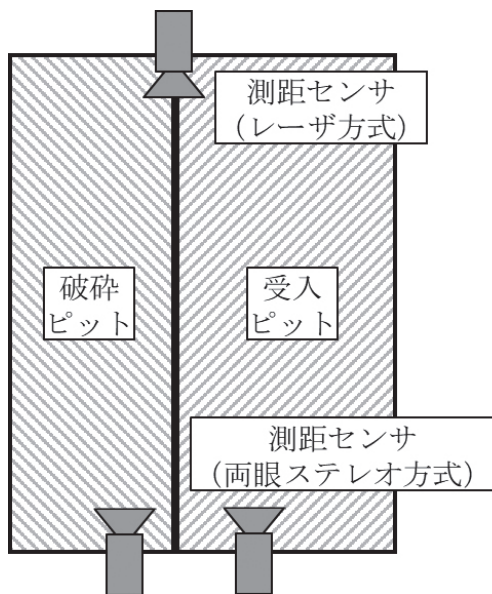


図2 ごみピット3D計測の機器構成模式図(受入・破碎2段ピット方式の平面図)



図3 測距センサ(左:レーザー方式, 右:両眼ステレオ方式)

ッカーボードを用いる手法が一般的であるが²⁾、ごみ高さの計測ではチェッカーボードをピット内に持込むのは困難である。本技術では、ピット壁面上の目盛を使った独自のキャリブレーション手法を構築した。以下に詳細を記す。

2.2.1 3D座標系に存在する物体をカメラで撮影したときの画像座標値

図4は全体座標系 $\Sigma 0$ とステレオカメラ上で定義されるカメラ座標系 $\Sigma 0'$ 、およびその位置関係を示したものである。

$\Sigma 0$ と $\Sigma 0'$ の原点は、 $\Sigma 0$ で x 方向に L_x 、 y 方向に L_y 、 z 方向に L_z だけ離れている。 $\Sigma 0$ での座標 (x_0, y_0, z_0) に存在する物体について、 $\Sigma 0'$ での座標 (x'_0, y'_0, z'_0) は、ステレオカメラの設置角度を $\Sigma 0$ の x 軸まわりに θ と定義すると、式(1)で表される。

$$\begin{bmatrix} x'_0 \\ y'_0 \\ z'_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} \quad \dots \text{式 (1)}$$

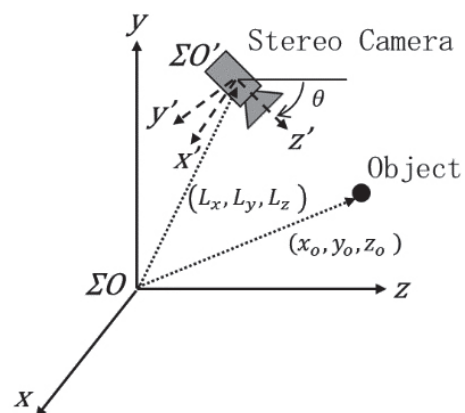


図4 全体座標系 $\Sigma 0$ とカメラ座標系 $\Sigma 0'$

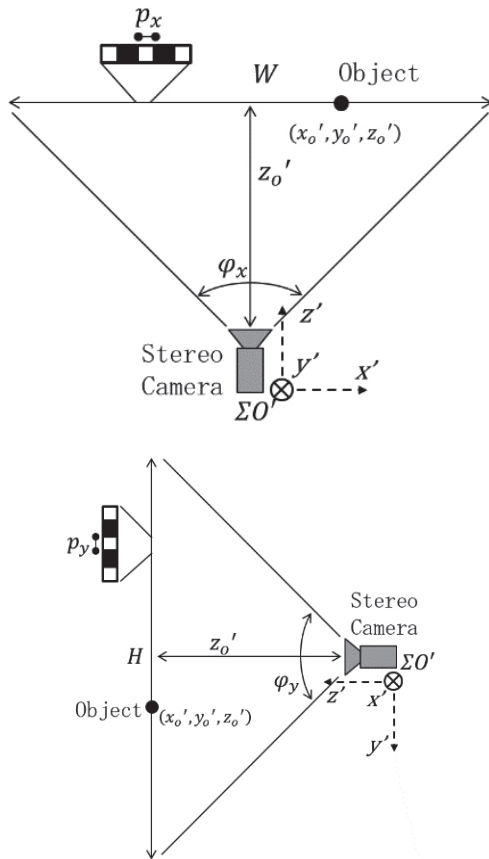


図5 $\Sigma 0$ における物体位置とカメラ視野角・画素数の関係（上段：水平方向，下段：鉛直方向）

また図5は、 $\Sigma 0'$ における物体の3D位置と、カメラ視野角・画素数の関係を表した模式図である。

水平方向のカメラ視野角・画素数をそれぞれ φ_x, W 鉛直方向のカメラ視野角・画素数をそれぞれ φ_y, H と定義すると、撮影画像の水平方向の1ピクセルに相当する長さ p_x と鉛直方向の1ピクセルに相当する長さ p_y は、それぞれ式(2)、(3)で表される。

$$p_x = \frac{z_o' \times \tan(\varphi_x/2)}{W/2} \quad \dots \text{式 (2)}$$

$$p_y = \frac{z_o' \times \tan(\varphi_y/2)}{H/2} \quad \dots \text{式 (3)}$$

さらに、撮影された物体の理論画像座標値(X_0^{th}, Y_0^{th})は、それぞれ式(4)、(5)で表される。

$$X_0^{th} = \frac{x_o'}{p_x} + \frac{W}{2} \quad \dots \text{式 (4)}$$

$$Y_0^{th} = \frac{y_o'}{p_y} + \frac{H}{2} \quad \dots \text{式 (5)}$$

2.2.2 ピット内に堆積したごみ位置の3D座標演算アルゴリズム

ごみピット3D計測では、まずピット壁面上の複数の目盛について、実際に撮影された画像の座標値(X^{re}, Y^{re})と、式(1)～式(5)を元に演算された理論画像座標値(X^{th}, Y^{th})を算出する。実画像座標値(X^{re}, Y^{re})と理論画像座標値(X^{th}, Y^{th})は、レンズの歪みなどの影響で差が生じるため、算出したそれぞれの画像座標値を参照して、実画像座標値から理論画像座標値へと補正するための校正式(式(6))を最小二乗法などで構成する。

$$(X^{th}, Y^{th}) = f(X^{re}, Y^{re}) \quad \dots \text{式 (6)}$$

また、ピット内に堆積したごみの実画像座標値についても、ステレオカメラの特徴量マッチング³⁾などから算出する。ごみの実画像座標値をピット壁面上の目盛と同様に式(6)に代入することで、理論画像座標値を算出することができる。そして、ごみの理論画像座標値に対し、式(1)～式(5)を逆算することで、 $\Sigma 0$ におけるごみの3D点群座標を算出することができる。

図6は、上記のアルゴリズムを基に実際のピット



図6 両眼ステレオ方式によるごみ高さ取得結果

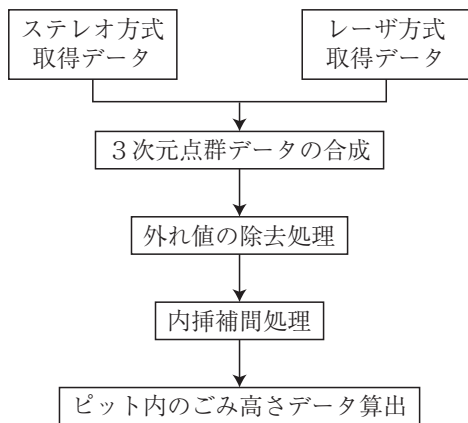


図7 3D点群データ処理アルゴリズム

内のごみ高さを計算し3D表示した結果の一例である。破碎ピット・受入ピットだけでなく、仕切り上にあるごみ高さもおおむね再現されており、本キャリブレーション手法の有効性を確認することができる。

2.3 3D点群データ処理アルゴリズム

3D点群データ処理アルゴリズムの概略を図7に示す。ごみピット全面のごみ高さを算出するために、レーザ方式、ステレオ方式それぞれで取得した3D点群データを合成した後、外れ値の除去処理、内挿補間処理の2つの処理を実行するアルゴリズムを考案した。

以下に詳細を記す。

2.3.1 外れ値の除去処理

運転中のクレーンの映込みなどを、外れ値として判断して除去する。3D点群データはごみ面より下部の情報を取得できないことを利用し、ここではピットを格子状の区画に分割し、それぞれの区画で高さが最小の点以外の点群を除去する独自のフィルタ処理を行った。図8に外れ値の除去処理結果の一例を示す。処理前はピット中央部にクレーンの映込みが見られるが、処理後ではごみ面の概形を保ったままクレーンの映込みを除去できている。

2.3.2 内挿補間処理

前項の外れ値処理で得られた点群データを参照点として、点群データの存在しない領域に関して内挿補間を行う。この点群データの存在しない領域は、クレーンやごみ山の影となり測量センサの死角となった箇所のことを指す。ここでは、ごみピットの長手方向に点群データを分割し、分割された点群データごとに線形補間を行う手法を用いた。

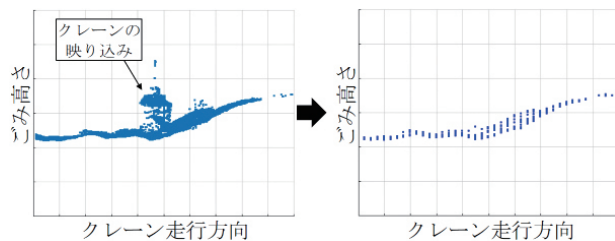


図8 外れ値の除去処理結果

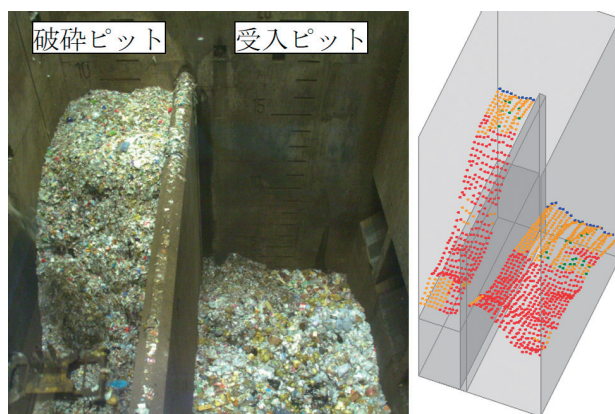


図9 現地3D計測結果

2.4 ごみピット3D計測結果

操業プラントにおける3D計測結果の一例を図9に示す。ピット内の画像より、運転中のクレーンが映込んでいることがわかるが、3D計測結果では外れ値として除去されていることが確認できる。また、クレーンやごみ山の影となった箇所では内挿補間がほどこされており、周囲の3D点群データから妥当な推定高さが算出されていることも確認できた。

むすび

本技術により、ごみピット内のごみ形状をリアルタイムかつ高精度に把握することができるようになった。これにより常に状況が変化し続けるごみ形状に対し、最適な動作を行わせることが可能になる。今後は、開発を進めている判断技術、操作技術と組合せてごみクレーン全自動化の実証を進め、自動化の効果を検証していく。

[参考文献]

- 1) 小野雄基ほか：AI・IoTを活用したごみ焼却施設の自動運転の高度化、環境技術(2020年4号), p.189-194
- 2) 井口征士, 佐藤宏介：三次元画像計測(1990), p.91-99, 昭晃堂
- 3) 奥富正敏ほか：デジタル画像処理(2004), p.218-237, CG-ARTS協会