

(解説)

廃棄物処理プラント向けクレーン自動運転技術

森田 啓^{*1}・清水克哉^{*1}・尾崎圭太^{*1}(博士(理学))・福川宙季^{*2}

Automatic Crane Operation for Waste Treatment Plants

Kei MORITA・Katsuya SHIMIZU・Dr. Keita OZAKI・Hiroki FUKUKAWA

要旨

廃棄物処理プラントでは焼却炉の安定操業のため、ごみクレーンを用いて搬入ごみの運搬攪拌(かくはん)作業を行っている。今回、ピット内にたまったごみの高さを計測する距離センサとごみ面の画像を取得するためのカメラの情報を基にごみピット内の状況を認識する技術(①ごみ高さ計測技術、②ごみ攪拌状態認識技術)、クレーンの動作を決定する技術(③運転員操作を再現するクレーン動作計画技術)、および決定された動作に従いクレーンを制御する制御技術(④3D計測情報と動作計画に基づいたクレーン制御技術)の四つの要素技術を開発した。これにより運転員の高度な認知・判断・操作スキルを代替する自動運転技術を開発したのでシステムの全体概要について紹介する。

Abstract

In waste treatment plants, cranes are used to transport and mix the waste to ensure the stable operation of incinerators. Four key technologies have been developed for measuring the height of waste accumulated in the waste pit and acquiring images of the waste surface: i.e. i) technology to recognize the situation inside the waste pit on the basis of distance sensors (waste height measuring technology), ii) technology to recognize the stirring state of the waste on the basis of camera information, iii) technology to reproduce the operator's actions in planning crane movement, and iv) crane control technology based on 3D measurement information and the movement planning. This paper introduces an overview of a developed system that utilizes the technologies mentioned above to automate the operation, aiming at substituting the high-level cognitive, judgmental, and operational skills of the operators.

検索用キーワード

自動運転, ごみクレーン, ごみ焼却炉, 画像処理, 3D計測, 機械学習, クレーン制御, 経路生成

まえがき=当社グループである(株)神鋼環境ソリューションでは、廃棄物処理メニューとして回転ストロカ式ごみ焼却炉、流動床式ごみ焼却炉(ガス化溶融、ガス化燃焼)など豊富なコア技術を保有しており、処理対象物および地域のニーズにあわせた処理技術の提案をしてきた。近年、日本国内において労働人口の減少、熟練技術者不足が問題となっており、廃棄物処理分野においても同様の問題を抱えている。また、日本国内の廃棄物処理プラントでは、建設と運転保守の包括受注方式(Design Build and Operate (DBO)方式)が主流になっている。当社および(株)神鋼環境ソリューションでは、これら潮流に対応する製品開発やソリューションの提案として廃棄物処理プラントの運転保守コスト削減に向けたごみクレーン自動化技術の開発に取り組んできた。

本稿では、従来熟練運転者の認知・判断・操作スキルによって行われていたクレーン運転を代替するクレーン自動運転技術について紹介する。

1. 自動運転システムの概要

廃棄物処理プラントでは、ごみ質のばらつきが焼却炉の燃焼状態に直結する。そこで、安定した燃焼状態を実現するため袋ごみや汚泥などの様々なごみを焼却炉に投

入する前段階に、ごみ質が均一になるようクレーンを用いて攪拌(かくはん)作業を行っている。クレーン作業としてはこのほかに、焼却炉ホッパへの投入作業、翌日のごみ受入対応のための積替作業など複雑な作業が多岐にわたる。しかもこれらは画一的な作業ではなく、時々刻々と変化のごみピット内の貯留状況に応じて運転員が作業内容を判断しなければならず、状況に応じて適切かつ複雑な作業を迅速に実行できる高い運転スキルが求められる。

図1にこれらの運転スキルを代替する自動化技術として開発したクレーン自動運転システムの概略図を示す。この図ではダブルピット形式(受入ピット/貯留ピット)の廃棄物処理プラントを例として示している。ピット内にたまったごみの高さを計測する距離センサとごみ面の画像を取得するためのカメラの情報を基にごみピット内の状況を認識する技術(①ごみ高さ計測技術、②ごみ攪拌状態認識技術)、クレーンの動作を決定する技術(③運転員操作を再現するクレーン動作計画技術)、および決定された動作に従いクレーンを制御する制御技術(④3D計測情報と動作計画に基づいたクレーン制御技術)の四つの要素技術により構成される。これら要素技術の組み合わせにより、従来クレーン運転員が行ってきた認知・判断・操作スキルを代替する。

^{*1} 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター ^{*2} (株)神鋼環境ソリューション 技術開発センター技術開発部

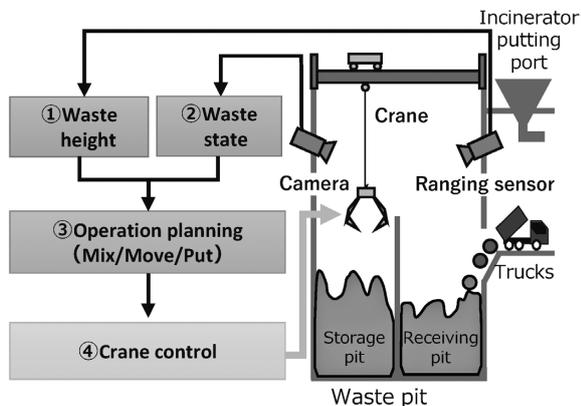


図1 クレーン自動運転システム概略図
Fig.1 Schematic of crane autonomous operation system

2. 自動運転システムの概要

本章では、前章にて述べた四つの要素技術の内容について紹介する。

2.1 ごみ高さ計測技術¹⁾

従来、クレーンコントローラにて保有する高さ情報は、ピット内を粗い番地に分割し、バケットがピット内のごみ山に着床した箇所に該当する番地の高さ情報を更新する。この方式では粗い分割による情報の分解能や情報更新のリアルタイム性（つかみ動作を行った時点でのみ更新）の点で信頼性に欠ける問題があった。今回、ごみピット全面の高さをリアルタイムに測定するため、距離センサ2台構成を採用している。各センサで取得した3D点群データに対してごみピット座標系に合わせた回転・平行移動処理を施し合成する。いっぽう、実運用に際して、クレーンや落下ごみが映り込むことで不要なデータが混在したり、ごみの堆積状態によって計測データが欠損したりすることで、得られた測定データが実際のごみ高さとは異なる場合がある。そこでデータ補正技術として、ノイズ除去処理と欠損部の補間処理技術を新たに開発した。図2に今回開発したデータ処理技術を適用した結果を示す。左図は計測時にクレーンが映り込み、距離センサの死角部分でデータが欠損している例である。本技術を適用することでクレーン映り込みを除去するとともに欠損箇所を補間し本来のごみ面形状に近い状態で計測できることを確認した。

2.2 ごみ攪拌状態認識技術²⁾

廃棄物処理プラントでは、袋ごみや汚泥など、様々なごみを受け入れている。受け入れたごみは焼却されるまでごみピット内に一時的に貯留される。ごみピット内では、焼却炉で安定した燃焼ができるように、ごみの均一化を目的とした攪拌操作が行われるが、運転員は全てのごみ種類を目視にて確認し、ごみ種類に応じた適切なクレーン操作により攪拌作業を行っている。

そこで、まずピット内カメラ撮影画像から搬入されたごみ種類を区別する技術を開発した。本技術で、ごみピットを撮像した画像からごみの種類と位置を認識する手法として、学習コストと精度の観点から物体検出法の一つであるSSD (Single Shot MultiBox Detector)³⁾を採

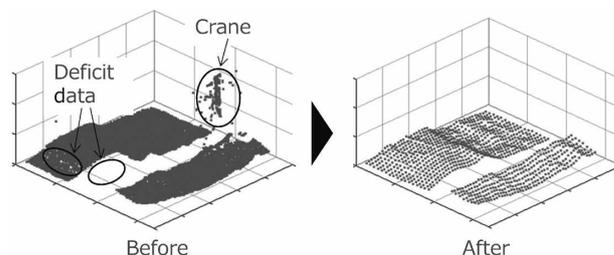


図2 3D計測データ補正処理結果例
Fig.2 Example of schematic of 3D data correction

用した。本手法では、入力画像に対して画像特徴量を抽出する畳み込みニューラルネットワークによって、様々なスケールの物体の種類と位置を同時に学習する。今回、事前の現場調査や運転員ヒアリングを行い、燃焼状態に影響をおよぼすごみ種として袋ごみや汚泥など6種類に大別できることが分かった。そこで、これら6種類を学習させることで搬入されたごみの種類を判別した結果を図3に示す。ここでは代表的なごみ種である袋ごみ、汚泥、草を検出できていることが分かる。

いっぽう、安定した燃焼状態の実現には、ごみ種の判別だけでなく、それらが十分に攪拌されていることが重要である。現状、運転員は過去の経験に基づき、ピット内を目視にて確認しごみの攪拌状態を感覚的に認識している。運転員の判断を再現するためにはごみの攪拌状態を定量的に把握する必要がある。しかしながら、攪拌されたごみは複数のごみが混ざった状態であるため、外見は千種万様である。そのため良く混ざった状態を直接画像から認識することは困難であった。そこで「攪拌ごみは特定のごみ種に分類できないもの」、すなわちごみ種を判別できなかった領域を攪拌された領域として定義することで、攪拌状態を定量的に評価する方法を考案した。図4に攪拌された領域と未攪拌の領域の検出結果の例を示す。図4の矩形（くけい）で囲った部分がSSD法により判別した領域であり、それ以外が攪拌された領域としてみなすことができる。この考えから、任意の対象範囲（図4のwidth×height）における攪拌状態を定量的に示す攪拌度Vとして定義した（式（1））。

$$V = 1 - \frac{S_{all}}{width \times height} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $S_{all} = \sum_{i=1}^n S_i^{bbox}$: 総検出面積（n個の矩形面積）

S_i^{bbox} : おのおのごみの検出領域（矩形面積）

算出される攪拌度は0から1の範囲の値を取り、攪拌度が0に近づくほど攪拌が不十分であり、攪拌度が1に近づくほど攪拌が進展していることを表す。

図5に攪拌度の時間推移とそのときの判別結果を示す。開始時点では攪拌度は0.5程度となっており十分攪拌ができていない値である。その時のピット内画像を見ると袋ごみなど矩形で囲われた箇所が大部分を占めており攪拌ができていないことが確認できる。その後、時間の経過とともに攪拌度が0.8程度まで上昇し、同時に矩形領域が減少して攪拌領域が増加していることが確認できる。今回、攪拌完了の目安としては攪拌度0.8程度を設定しており、目標の攪拌度まで攪拌していることがわ

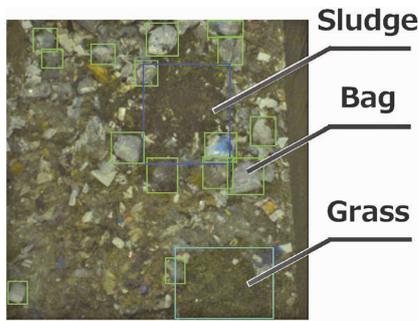


図3 ごみ種別結果例
Fig.3 Example of determining the type of waste

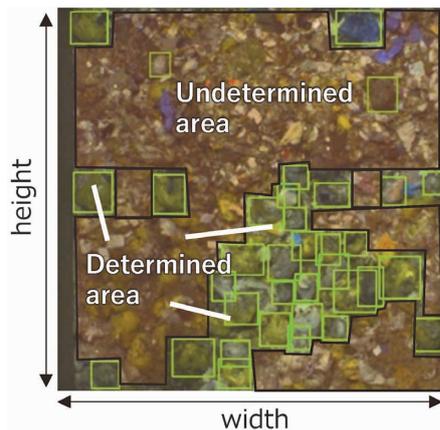


図4 未攪拌領域の検出方法
Fig.4 Detection method of unmixing area

かる。攪拌完了後は順次積替え作業を行い攪拌度が横ばいで推移している。ここで運転員の攪拌完了の判断を再現できる値として、運転員による手動操作時の攪拌度と同程度の値を目安値として設定した。このように本技術を適用することで、これまでは運転員が目視にて感覚的に判断していた攪拌状態を定量的に評価することが可能となる。

2.3 運転員操作を再現するクレーン動作計画技術⁴⁾

従来技術では事前に設定した動作を繰り返すのみしかできず、不必要な操作（過攪拌など）の発生や、新規ごみ搬入などの変化が生じた際には攪拌不十分となる可能性があるため、夜間などの閑散時間の短時間だけなど限定的な運用に留まり、大半は人による操作介入が必要となっていた。そこで長時間の自動運転を実現するため、運転員の操作ノウハウや操作履歴データを基にしたクレーン操作判断ロジックを構築した。構築した操作判断ロジックのフローチャートを図6に示す。2.1節のごみ高さ計測技術、および2.2節のごみ攪拌状態認識技術により認識するごみの種類・攪拌状態・高さに加えて、クレーン位置やプラント運転情報をインプット情報として、次に取るべきクレーンの操作内容を判断し、クレーンの目標位置など操作内容を算出する。これにより、従来、熟練運転員が行っていた各種判断を再現でき、ピット状況に応じて様々な制約条件にあわせた最適動作（積替／攪拌／投入）の計画を自動的に策定することができ、長時間の自動運転が可能となる。

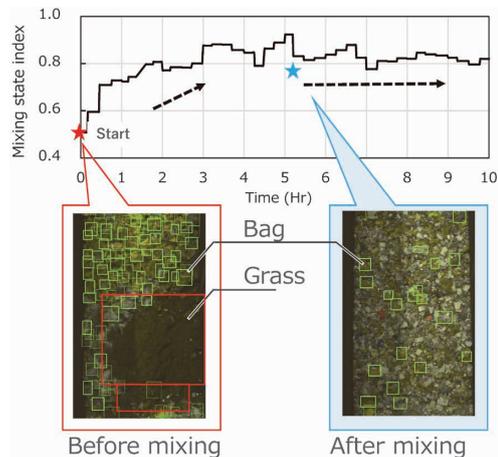


図5 攪拌状態認識結果
Fig.5 Result of distinction of mixing state

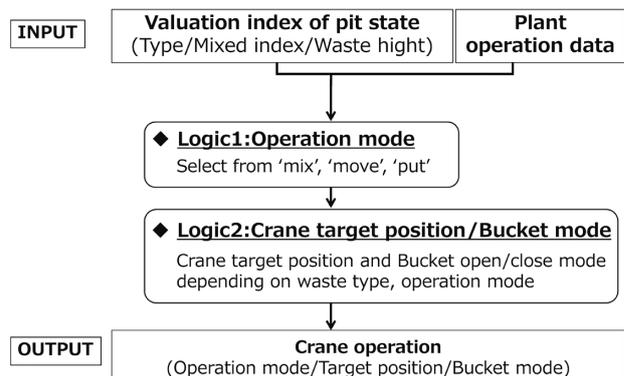


図6 動作計画決定フローチャート
Fig.6 Flow diagram of operation planning

2.4 3D計測情報と動作計画に基づいたクレーン制御技術⁵⁾

2.1節にて記載のとおり、従来のバケット着床箇所の高さを測定する方式では、測定の分解能やリアルタイム性の点で信頼性に欠けるためクレーンは過度な回避経路を取らざるを得ず、タクトタイム悪化の要因となっていた。そこで、2.1節のごみ高さ計測技術により高い信頼性のごみ高さ情報を取得できるようになることで、過度な回避経路を考慮する必要がなく、目的地まで適切な経路で移動するクレーン制御を開発した。図7に今回開発した経路生成技術の概略図を示す。ごみ高さ情報に関しては、2.1節のごみ高さ計測技術にて紹介したとおり、距離センサ2台によりピット壁死角を補完することで、ピット全面の高さを高精度かつ同時に測定ができる。このごみ高さ情報と動作計画にて指定された位置情報に基づき、クレーンの各軸移動速度を考慮した障害物回避経路を演算する。さらに、本技術では各軸の速度を減速させることなく曲がれるようにするため、スムージング機能を搭載することで、コーナー部で滑らかな経路を生成できる。これにより障害物を回避するための無駄な経路をたどることなく指定された目的地に到達することができる。その結果、経路によって短縮効果は異なるが、代表的な動作の一つであるピット間をまたぐ積替動作では約3割のタクトタイム改善を確認しており、全体動作に関しても作業性向上が期待できる。

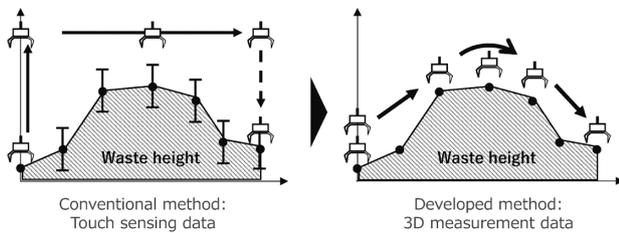


図7 ごみ高さ情報に基づいたクレーン経路生成
Fig.7 Crane pass planning based on waste height data

3. 実プラントでの自動運転評価

開発した四つの要素技術を組み合わせたクレーン自動運転技術を開発することで、運転員の判断を再現するとともに手動操作と同様の複合軸操作が可能となる。本技術の成立性を検証するため、これら技術を搭載した自動運転システムによる実機プラントで連続運転を行った。攪拌完了を示す攪拌度の目安は運転員による手動操作時と同程度として運転を実施した。

いっぽう、連続運転中に攪拌不十分のごみを誤って焼却炉内へ投入した場合、炉内燃焼状態が不安定となることが考えられる。そこで試験期間中の「NO_x量」の平均値、「蒸気流量」、「砂層温度」の標準偏差の相対値を表1に示す。ここでは、通常の手動操作による操業が行われている期間の各指標を1とした相対値として算出し、燃焼の安定性を評価した。表1に示すとおり、自動運転中の三つの評価指標は運転員による操作時と同等レベルとなっており、安定した燃焼状態を実現できることを確認している。

以上から、開発した四つの要素技術から構成するクレーン自動運転システムにて、従来熟練運転者の高度な運転スキルによって行われてきたクレーン運転を代替する

表1 手動操作に対する自動運転時の燃焼安定性評価 (手動操作時=1)

Table 1 Evaluation of combustion stability during automatic operation compared to manual operation. (manual operation = 1)

NO _x (Avg.)	1.00
Steam flow rate (SD)	1.03
Sand temperature (SD)	0.65

クレーン自動運転技術として有効であることを確認した。

むすび=今回、廃棄物処理プラントにおいて、ごみクレーン運転員の高度な認知・判断・操作スキルを代替するクレーン自動運転技術を開発した。今後も、ごみ焼却施設における自動運転の高度化を進めるとともに、今後の操業技術者不足への対応に留まらず、持続的社会的な実現に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 上村祥平ほか. ごみピット3D計測技術の開発. 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿. 2020, p.253-254.
- 2) 尾崎圭太ほか. 画像AI技術を用いたごみ種センシング機能の開発. 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会 講演原稿, 2020, p.247-248.
- 3) Wei Liu et al., SSD: Single Shot Multibox Detector, ECCV 2016, p.21-37.
- 4) 福川宙季ほか. ごみクレーン動作計画自動化技術の開発. 第44回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集. 2023, p.227-229.
- 5) 清水克哉ほか. クレーン自動制御システムの開発—ごみピット情報に基づいたクレーン経路生成機能に関して—. 第44回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集. 2023, p.218-220.