

## 東芝アナリティクスAI SATLYSによる 廃棄物処理施設の作業効率向上

Professional Service of SATLYS Toshiba Analytics AI to Improve Efficiency of Operations in Waste Treatment Facilities

太平 英貴 OHIRA Hidetaka

廃棄物処理施設では、環境意識の高まりや、地方財政のひっ迫、少子高齢化の影響などを背景に、処理作業の効率化が課題となっている。その中で、AI技術を活用したごみクレーンの自動運転は、廃棄物の効率的な処理方法の一つとして期待されている。

東芝グループは、東芝アナリティクスAI“SATLYS（サトリス）”のプロフェッショナルサービスとして、単眼カメラで撮影したごみピットの画像から、廃棄物の種別や、攪拌（かくはん）状態、積み上げ高さなどを認識する技術を開発した。この技術を（株）川崎技研が開発したAIごみクレーン全自動システムに組み込み、難しいクレーン制御が要求される場合でも、高精度かつ効率的な攪拌・積み替え作業を可能にした。

There is a growing need for waste treatment facilities in Japan to improve the efficiency of their waste treatment operations, accompanying the rising awareness of environmental issues, tight financial situation faced by local governments, and aging of workers in recent years. In this context, attention is being increasingly focused on the application of automatically controlled cranes using artificial intelligence (AI) technologies to waste pits in order to efficiently stir and transship wastes.

As an addition to its professional service lineup of SATLYS Toshiba Analytics AI services, the Toshiba Group has developed a technique to recognize conditions in waste pits including the type of waste, waste stirring condition, and height of waste, using images captured by a monocular camera. This technique has been incorporated into a fully automatic AI waste crane system developed by Kawasaki Giken Co., Ltd., which makes it possible to precisely and efficiently perform waste stirring and transshipment even in cases where difficult crane control operations are required.

### 1. まえがき

廃棄物処理施設では、環境問題への意識の高まりや地方財政のひっ迫などから、作業の効率化による処理コストの低減が求められている。廃棄物の焼却処理や搬入処理では、ごみクレーンを用いて、ごみピット内の廃棄物を攪拌して均一化する作業や、廃棄物を積み替える（ごみピット内で移動させる）作業が行われている。廃棄物処理コストの低減には、これらの作業の効率化が重要である。しかし、少子高齢化に伴う熟練運転員の減少などで、効率的に作業を行うことが難しくなり、ごみクレーンの自動運転による廃棄物処理作業の効率化への期待が高まっている。

東芝グループは、東芝アナリティクスAI“SATLYS（サトリス）”<sup>(1)</sup>のプロフェッショナルサービスの一環として、単眼カメラで撮影したごみピットの画像から、廃棄物の種別や攪拌状態、積み上げ高さなどを認識する技術を開発した。この技術を（株）川崎技研が開発したAIごみクレーン全自動システム<sup>(2)</sup>に組み込むことで、①未攪拌の廃棄物だけを的確に選んで攪拌する、②汚泥や剪定（せんてい）枝といった廃棄物の種類ごとに適切な処理をする、③新たな廃棄物をご

みピットに搬入しやすいように投入扉付近にある廃棄物を積み替える、といったような、従来の自動運転では難しい複雑なクレーン制御が可能になった。これにより、大規模な処理施設だけでなく、難しいクレーン制御が要求される小規模の処理施設でも、クレーンの自動運転による高精度かつ効率的な攪拌・積み替え作業が可能になった。ここでは、今回開発した廃棄物の認識技術とその評価結果について述べる。

### 2. 廃棄物の認識技術

廃棄物の認識技術は、領域分割器と高さ推定器で構成したシステムで実現した。領域分割器は、単眼カメラで撮影したごみピット内の画像（図1(a)）を基に、攪拌済みの廃棄物が映る領域や汚泥が映る領域など、廃棄物の種別や攪拌状態ごとに、撮影画像の領域を分割して出力する（図1(b)）。また、高さ推定器は、撮影画像から廃棄物の積み上げ高さを推定して出力する（図1(c)）。

2.1節と2.2節では、それぞれ領域分割器と高さ推定器の機能について説明する。

#### 2.1 廃棄物領域の分割

廃棄物領域を分割する領域分割器は、ごみピット内の画

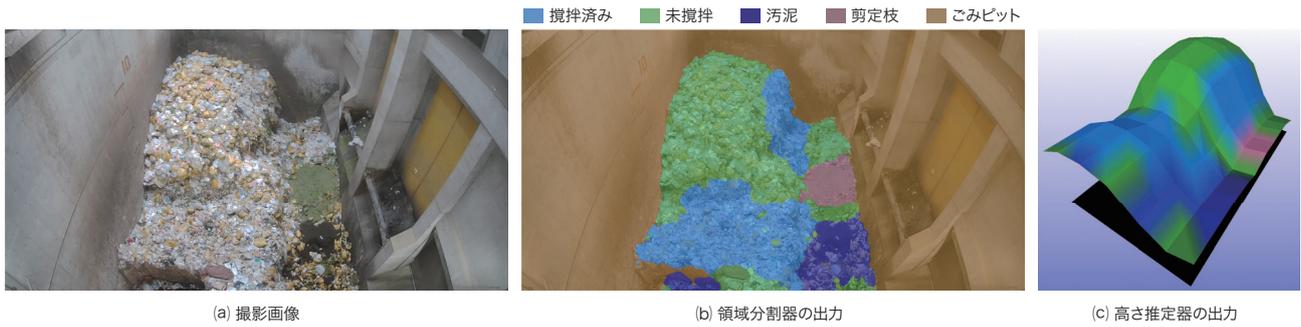


図1. ごみピット内の廃棄物の認識技術の例

領域分割器は、廃棄物の種別や攪拌状態ごとに画像領域を分割した結果を出力する。高さ推定器は、廃棄物の積み上げ高さの推定結果を出力する。

Examples of techniques to recognize wastes in waste pit

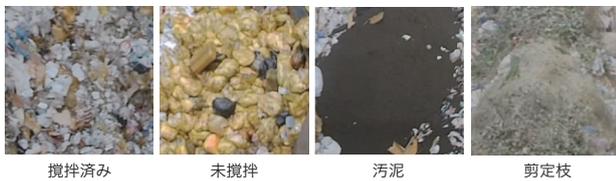


図2. パッチ画像の例

一つのクラスだけが映るパッチ画像を用いることで、教示作業のコスト低減及び容易化が可能となる。

Examples of patch images for waste segmentation

像を、攪拌済み領域、未攪拌領域、汚泥領域、剪定枝領域、及びごみピット領域の5クラスに分割する。

一般的な領域分割器は、画像の全ピクセルに対して、正解クラスを手で教示した学習データを使用して生成される。しかし、ピクセル単位の教示は高コストになるという問題がある。また、攪拌済みの領域と未攪拌の領域との境界を明確に教示する作業は、領域の境界が曖昧なことなどが理由で、廃棄物処理の関係者でも難しいという問題もある。

これらの問題の解決策として、図2のような、画像の一部を切り出したパッチ画像を用いて領域分割器を生成する手法を開発した。攪拌済みの廃棄物だけが映るパッチ、汚泥だけが映るパッチというように、一つのパッチに一つのクラスだけが映るパッチを用いることで、ピクセル単位ではなくパッチ単位の教示が可能になり、教示に掛かるコストを低減できる。また、廃棄物を明確に区別できるパッチを用いることで、境界が曖昧になるといった問題がなくなり、教示作業が容易になる。

開発した領域分割器は、パッチ画像を用いて全ピクセルに正解クラスを教示した学習データを疑似的に作成し、その疑似学習データを用いて生成する。その処理フローを図3に示す。

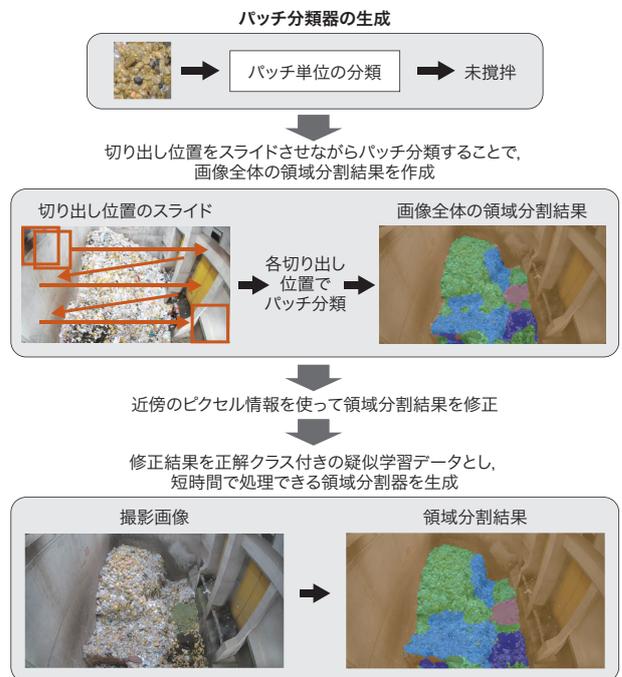


図3. パッチ画像から領域分割器を生成する処理フロー

まず、パッチ画像を分類するパッチ分類器を生成する。次に、画像の切り出し位置をスライドさせながらパッチ分類することで画像全体の領域分割結果を作成する。更に、近傍のピクセル情報を用いて修正した領域分割結果を基に、短時間で処理可能な領域分割器を生成する。

Flow of processes for generation of waste segmentation model from patch images

まず、正解クラスを教示したパッチ画像により、パッチ単位で廃棄物を分類するパッチ分類器を生成する。

次に、画像の切り出し位置をスライドさせながら、各々の切り出し位置でパッチ分類する。そして、各切り出し位置でのパッチ分類結果をつなぎ合わせることで、画像全体の領域分割結果を作成する。その際に、スライド幅がパッチサイズより小さいため、ピクセルによっては複数のパッチ分類結

果を重ねてつなぎ合わせる必要がある。このようなピクセルは、重なったパッチ分類結果の平均スコアを算出し、最もスコアが高いクラスを領域分割結果として採用した。

更に、近傍のピクセル情報を用いて領域分割結果を修正することで、特に境界付近の領域分割結果を高精度化する。

この修正結果を最終的な領域分割結果として採用することもできるが、切り出し位置のスライドや修正処理は処理時間が長くなる。このため、システムの性能に合わせたリアルタイム動作を実現するには、運用時にGPU (Graphics Processing Unit) などの高性能デバイスが必要で、高コストになるという問題がある。そこで、修正後の領域分割結果を疑似的な正解クラスとして全ピクセルに教示した疑似学習データを、新たに作成した。この疑似学習データを用いることで、ピクセル単位の教示を人手で行うことなく、短い時間で処理可能な領域分割器を生成できる。パッチ単位の教示だけで領域分割器を生成可能にすることで、教示作業が容易になり、コストが低減できる。

このように、短い時間で処理可能な領域分割器を利用することにより、CPUでも、運用時における廃棄物領域分割のリアルタイム動作が可能になる。

## 2.2 廃棄物の積み上げ高さの推定

廃棄物の積み上げ高さは、高さ推定器を用いて推定する。

一般的な高さ推定器は、複数台のカメラや、レーザーレンジファインダーなどの特殊な機材を用いる必要があるため、導入コストが高く、かつ複雑な構成になるという問題がある。

この問題の解決策として、廃棄物の領域分割結果と、CAD情報などを基に事前に計測したごみピットの形状とを用いることで、単眼カメラでも積み上げ高さの推定ができる手法を開発した。積み上げ高さ推定の処理フローを図4に示す。

まず、廃棄物が投入されていない、空のごみピットに対する、カメラ視点のデプス画像をCG (コンピュータグラフィックス) で作成する。このデプス画像は、事前に計測したカメラとごみピットの位置関係と、CADデータから取得したごみピットの形状から作成できる。作成したデプス画像と、カメラとごみピットの位置関係とを用いれば、デプス画像の各ピクセルに対応する箇所のごみピットの高さ・奥行き・横方向の位置 (3次元座標) を逆算できる。

次に、領域分割結果から、ごみピット領域とごみピット以外 (廃棄物) の領域との境界を抽出する。この境界上の廃棄物は、接しているごみピットの箇所と同じ3次元座標になる。境界のピクセル位置に対応するごみピットの3次元座標をデプス画像から取得することで、境界上の廃棄物の3次元座標を求められる。ただし、カメラ画像の領域分割結果から得

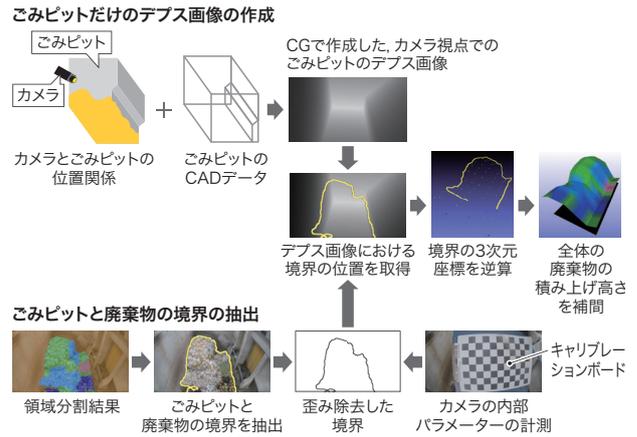


図4. 撮影画像の領域分割結果と、ごみピットのCADデータを基に廃棄物の積み上げ高さを推定する処理フロー

まず、カメラとごみピットの位置関係と、CADデータから取得したごみピットの形状を用いて、空のごみピットのデプス画像を作成する。次に、領域分割結果からごみピットと廃棄物の境界を抽出する。これらの結果から、境界の3次元座標を算出し、それを線形補間することで、全体の積み上げ高さを推定する。

Flow of processes for estimation of waste height using result of waste segmentation and computer-aided design (CAD) data of waste pit

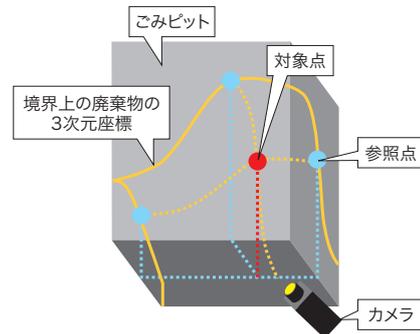


図5. 線形補間による廃棄物の3次元座標の推定

対象点の奥行き方向と左右横方向に位置する、ごみピットとの境界上の廃棄物の3次元座標を参照し、線形補間することで対象点の3次元座標を推定する。

Three-dimensional waste position estimation using linear interpolation

られた境界には、カメラ歪み (ひずみ) などの影響が含まれている。このため、キャリブレーションボードなどを用いて計測したカメラの内部パラメーター情報を用いて、3次元座標を取得する前に、カメラ歪みなどの影響を除去する。

最後に、ごみピットと接していない廃棄物の3次元座標を、境界の3次元座標の線形補間によって推定する。一般的な物体は形状が不定のため、線形補間では高精度に3次元座標を推定できないが、ごみピット内の廃棄物は滑らかに積み上げられているため、線形補間でも高精度に推定できる。線形補間では、図5に示すように、推定対象の廃棄物の箇

所(対象点)を決め、対象点の左右方向と奥行き方向に位置する境界上の廃棄物を参照点として取得する。参照点は境界上の廃棄物であるため、3次元座標を算出できる。対象点からの距離に応じた重みで参照点の3次元座標を線形補間することにより、対象点の3次元座標を推定する。推定した3次元座標の高さ成分を廃棄物の積み上げ高さとし、推定対象の全ての点で積み上げ高さを求めることで、全体の廃棄物の積み上げ高さを推定する。

このように、単眼カメラの画像から廃棄物の積み上げ高さの推定を可能とすることで、導入コストが低く単純な構成の高さ推定器を実現できる。

### 3. 評価実験

評価実験では、評価用のパッチの正解クラスと、パッチを切り出した位置の領域分割結果のクラスを比較して、パッチ再現率を測定した。また、領域分割器の処理時間を測定した。ピクセル単位での領域分割精度や、積み上げ高さの推定精度の評価は、正解を教示したデータがないため実施していない。これらの精度評価は、今後の課題である。

実験の結果、パッチ再現率は攪拌済み領域、汚泥領域、剪定枝領域、及びごみピット領域では100.0%であり、未攪拌領域では99.2%であった。処理時間については、Intel® Xeon® Gold 6136(動作周波数3.00 GHz)を用いて領域分割したところ、システム全体のリアルタイム動作に必要な処理時間よりも短い、画像1枚当たり1.69秒で動作した。

評価実験の結果、開発した高精度な領域分割器がシステムのリアルタイム動作に対応できることを確認した。ただし、今回の実験では、短期間に収集したパッチ画像で評価したため、季節や日照条件の違いによるごみの種類や見かけの変化の影響に対する評価は実施できていない。これらの評価は今後の課題である。

### 4. あとがき

自動運転によるクレーンの効率的な運用を実現するために、単眼カメラ画像からごみピット内の廃棄物の種別や攪拌状態、積み上げ高さを認識できる技術を、SATLYSのプロフェッショナルサービスの一環として開発した。廃棄物領域の分割については、パッチ画像から領域分割器を生成する手法を開発することで、ピクセル単位の教示ではなく、パッチ単位の教示を可能とし、教示コストの低減を可能にした。また、廃棄物の積み上げ高さの推定については、廃棄物の領域分割結果とごみピットのCADデータを用いることで、単眼カメラでも推定可能にし、導入コストの低減や構成の単純化を実現した。

評価実験では、パッチ再現率が99.2%以上であった。処理時間は、画像1枚当たり1.69秒であり、システムの動作周期内でリアルタイム処理できることを確認した。

この技術を組み込んだ(株)川崎技研のAIごみクレーン全自動システムの実証実験では、小規模施設でも効率的な攪拌・積み替え作業が実現できることが報告されている<sup>(2)</sup>。

今後は、この技術をSATLYSの汎用的なサービスとして提供可能にすることで、より多くの廃棄物処理施設へのシステム導入を進めていく。

### 文献

- (1) 東芝デジタルソリューションズ, 東芝アナリティクスAI SATLYS™, 東芝デジタルソリューションズ, <<https://www.toshiba-sol.co.jp/pro/satlys/>>, (参照 2022-04-14).
- (2) AIごみクレーン全自動システムを開発, The Waste Management, 2021, 1640, p.3.

・Intel, Xeonは、Intel Corporationの米国又はその他の国における商標。



大平 英貴 OHIRA Hidetaka  
研究開発センター  
知能化システム技術センター AI 応用推進部  
AI Application Dept.