

&lt;研究発表&gt;

## ステレオ画像を用いたホッパ内ごみの 表面形状の計測に関する研究

Surface Shape Measurement of Waste Stacked on Hopper  
in Municipal Refuse Incinerator by Using Stereo Image Processing

○伊藤大輔<sup>1</sup>、藤原健史<sup>1</sup>、武田信生<sup>1</sup>、高岡昌輝<sup>1</sup>、角田芳忠<sup>2</sup>、中塚大輔<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科環境工学専攻 / 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

<sup>2</sup> (株) タクマ / 〒 660-0806 尼崎市金楽寺 2 丁目 2 番 33 号

DAISUKE ITO<sup>1</sup>, TAKESHI FUJIWARA<sup>1</sup>, NOBUO TAKEDA<sup>1</sup>

MASAKI TAKAOKA<sup>1</sup>, HIDETADA KAKUTA<sup>2</sup>, DAISUKE NAKATSUKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

/Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

<sup>2</sup> TAKUMA CO., LTD.

/2-2-33 Kinrakuji-cho, Amagasaki, Hyogo 660-0806, Japan

### Abstract

One of main factors that vary the state of waste combustion in municipal refuse incinerator is a change in the quality and quantity of the waste that is actually fed into the furnace. Because it is difficult to grasp the change, a feed forward control of the waste combustion still cannot be achieved. In this study, from a necessity for estimating the accurate amount of the fed waste, the stereo image processing was examined to measure the surface shape of the waste stacked on the hopper and the change of waste volume was calculated.

**Key Words :** Municipal Refuse Incinerator, Feed of Solid Waste, Stereo Image Processing, 3-D Recognition of Shape

## 1 はじめに

我が国では焼却処理は一般的な固形廃棄物の処理方法として浸透している。しかし、一方で焼却に伴い発生するばいじん、NOx、SOx、そして近年ではダイオキシン類などによる環境汚染が問題になっている。ごみの燃焼過程でダイオキシン類の発生を抑制するためには、炉内を完全燃焼状態に保つことが必要とされる<sup>1)</sup>。これまでごみ焼却炉では、炉内の燃焼改善を図るために、燃焼室の構造の再検討やファジィ制御等の制御システムの導入など、未燃物や汚染物質の排出抑制に向けた取り組みが精力的になされてきた。しかし、燃焼状態を変動させる主要因は供給されるごみの量と質の変化によるものであるため、装置の改善や燃焼状態からフィードバック制御

するだけでなく、供給されるごみの質と量を把握し、予測的に燃焼を制御することが望まれる。我々はホッパシュート内のごみの圧密・供給をモデル化し、ホッパ内のごみ表面形状変化、投入ごみ重量とごみの圧縮特性から燃焼室へのごみ供給量を推定、予測する方法について研究しているが、本報告ではその内、ステレオ画像を用いてホッパ内のごみ表面形状計測を試みた結果について述べる。

## 2 ごみ供給量推定の手法

本研究ではまず、燃焼室前の給じん装置（以下フイダ）に送られるごみの量を求める。議論の前提と

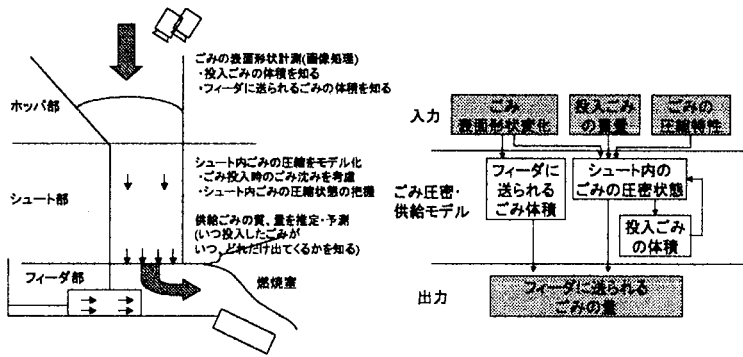


Fig.1 ごみ供給量推定手法のイメージ

してフィーダに流れていくごみの体積はホップ内ごみの見かけ体積の変化量と一致していると仮定した。

まず、ごみ投入前後のホップ内のごみの表面形状変化と投入ごみの重量から、投入されたごみの体積を測定する。その際、すでに投入されたごみ对新しく投入されたごみの荷重によって圧縮されることを考慮し、投入ごみの体積をより正確に知るとともに、ホップ、シュート内のごみの圧縮状況を推定する。次に、フィーダによりごみが送られている時、ホップ内のごみの表面形状の時間変化からフィーダに送られたごみの体積を測定する。これをごみ投入時に得たシュート内ごみの圧縮状態とあわせて、フィーダ部分に送られるごみの量を推定する。(Fig.1)

このようにごみ供給量を推定するにあたって、ごみ表面形状を求めることが重要となる。

### 3 ステレオ画像を用いたごみ表面形状計測

ごみ表面形状計測にはステレオ画像を用いる方法のほか、レーザー距離計を用いる方法などが考えられる。レーザー距離計の方が精度も高く高速に測定をおこなう事ができるが、計測できるのはごみの1断面形状のみであるため、今回はごみの表面形状を3次元的に得ることができ、また、今後ごみ質の推定などに利用できる可能性を持つ画像処理を用いた方法を採用した。

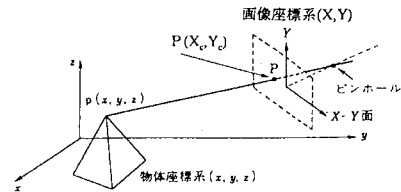


Fig.2 物体座標系と画像座標系

### 3.1 ステレオ計測の概要

画像座標系と実際の物体座標系の関係が分かっている2枚以上の画像それぞれにおいて、同一点を指している各画像上の座標を求め、次にその点の物体座標を計算した。さらにホップの形状やごみの写っている範囲を考慮に入れて後処理を行うことで、表面形状を求めた。

### 3.2 ステレオ画像を用いた座標計算方法

#### 3.2.1 物体座標系と画像座標系との関係<sup>2)</sup>

Fig.2のように物体座標系  $(x, y, z)$  と画像座標系  $(X, Y)$  を定めると、対象物体の座標  $(x, y, z)$  とカメラの仮想結像上の点、すなわち画像座標系との対応点  $(X_c, Y_c)$  の関係は以下ようになる。

$$[H_c X_c \quad H_c Y_c \quad H_c] \tag{1}$$

$$= [x \quad y \quad z \quad 1] \begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & C_{31} \\ C_{12} & C_{22} & C_{32} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} \end{bmatrix}$$

ただし、 $H_c$ はカメラの焦点距離などから求まる定数、12個のCパラメータは、物体とカメラの2つの座標系の相対位置、方向関係およびカメラの焦点距離で定まる量であり、このC行列をカメラパラメータと呼ぶ。

カメラパラメータはカメラの位置、方向などを計測して算出することもできるが、現実には焦点距離値などを正確に与えることは難しく、こうした方法でカメラパラメータを算出することは通常行われな。3次元形状が既知の基準物体を用意し、それを撮影して求める方が実用的である。

### 3.2.2 カメラパラメータのキャリブレーション<sup>2)</sup>

物体表面の点  $p_i (x_i, y_i, z_i)$  と、その画像上の対応点  $P_i (X_{ci}, Y_{ci})$  からカメラパラメータを求めることができる。今、1つの点  $p_1$  についてその物体座標と画像上の対応点の座標  $x_1, y_1, z_1, X_{c1}, Y_{c1}$  がわかっているとすると、(1)式から次の2つの式が得られる。

$$C_{11} + C_{12}y_1 + C_{13}z_1 + C_{14} \quad (2)$$

$$-C_{31}x_1X_{c1} - C_{32}y_1X_{c1} - C_{33}z_1X_{c1} = C_{34}X_{c1}$$

$$C_{21} + C_{22}y_1 + C_{23}z_1 + C_{24} \quad (3)$$

$$-C_{31}x_1X_{c1} - C_{32}y_1X_{c1} - C_{33}z_1X_{c1} = C_{34}Y_{c1}$$

1個の点について2つの関係式が得られるので、 $C_{11} \sim C_{34}$ の12個のパラメータを決定するためには、同一平面上にない6個の基準点が最低必要となる。6個以上の基準点を利用して最小2乗法を用いることにより、カメラパラメータを計算する。

### 3.2.3 物体座標の計算

カメラパラメータのわかっている2つ以上のカメラを用いて同一点を撮影すると、各画像上の対応点の座標  $(X_c, Y_c)$  から、それぞれの画像について  $(x, y, z)$  の関係を表す式が(2)(3)式のように2つずつ得られる。このように、2つ以上のカメラを

用いれば  $x, y, z$  の3つの未知数につき4つ以上の関係式が得られるので、これを最小2乗法で解くことにより、その点の物体座標系の座標  $(x, y, z)$  を計算する。

## 3.3 画像座標の対応づけ

画像上の点の座標を計算するためには、画像間で同一の点を指している画素の対応付けを行う必要がある。今回は画像から物体の角などの特徴点を抽出し、それらを対応付けることにより座標の計算を行った。

### 3.3.1 特徴点の抽出

以下に示す2つの方法を試みた。

#### 1) 濃度変化が大きい点の抽出<sup>3)</sup>

物体の頂点などすべての方向で濃淡レベルの大きな変化が見られる点であって、かつその付近でもっとも大きな変化を示す点を特徴点として抽出する。

ここでは、画像中各画素の濃淡レベルの変動  $f''$  を以下のように定義し、濃淡レベルが局所的に大きな点の特徴点として抽出した。ただし、対象画像の座標  $(x, y)$  における画素の濃度を  $f(x, y)$  とする。

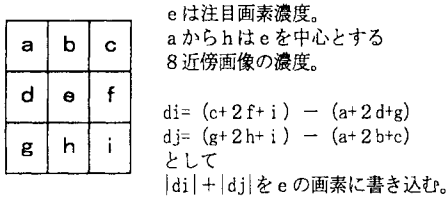
$$\left. \begin{aligned} f'_1(x, y) &= \{2 \cdot f(x, y) \\ &\quad - (f(x-1, y) + f(x+1, y))\}^2 \\ f'_2(x, y) &= \{2 \cdot f(x, y) \\ &\quad - (f(x, y-1) + f(x, y+1))\}^2 \\ f'_3(x, y) &= \{2 \cdot f(x, y) \\ &\quad - (f(x+1, y-1) + f(x-1, y+1))\}^2 \\ f'_4(x, y) &= \{2 \cdot f(x, y) \\ &\quad - (f(x-1, y-1) + f(x+1, y+1))\}^2 \\ f''(x, y) &= \min\{f'_i(x, y)\} \end{aligned} \right\} (4)$$

#### 2) 線成分の交点の抽出

画像中の線成分を抽出し、2つ以上の線が交差する点を特徴点とする。線成分の交点は以下の①～⑤の手続きにより求める。

#### ① ソーベルフィルタによるエッジ強調

各画素を中心とした画素数  $3 \times 3$  の矩形領域の画素濃度を参照し、Fig.3に示す処理をおこなうことによりエッジを強調する。

Fig.3 ソーベルフィルタによるエッジ強調<sup>4)</sup>

## ② 2値化処理

各画素の濃度をしきい値によって0または1に変換する。

## ③ 膨張処理による近接線の結合

2値化画像の当該画素濃度が1か、その4近傍の画素が1ならばその画素濃度を1とする。この操作により近接する線が膨張してつながる。

## ④ 細線化

幅を持つ線を削って線幅1まで細める。

## ⑤ フィルタによる交点抽出

線成分の抽出された2値画像において、線上の各点についてその点を中心とした画素数3×3の矩形領域を調べ、その領域に濃度1の画素が4つ以上ある点を交点とした。Fig.4にそのイメージを示す。

1から4までの処理にはWinRoof<sup>5)</sup>というソフトを用いた。

1)、2)の方法による特徴点抽出結果をFig.5、Fig.6にそれぞれ示す。写っているものは新聞紙、コップ、箱、ペンである。1)の方法のみでは物体の縁など対応付けを誤りやすい点が多数抽出されている。そのため、実際にごみに適用する際には2)の方法を用いた。

## 3.3.2 マッチング

各画像の抽出された特徴点のうち、同一点を示す特徴点を対応させ、対応づけられた点についてその座標を計算する。ここでは今回行った濃淡情報を用いた2画像間(それぞれ画像1、画像2とする)のマッチングについて述べる。

画像1の特徴点 $a_i(x_i, y_i)$ と $a_i$ に対する対応点候補 $b_i(x'_i, y'_i)$ の類似度 $e$ を、それぞれの特徴点を中心とした一辺 $(2r+1)$ ピクセルの矩形領域における濃度情報を用いて以下のように定義する。

$$e = \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r \{f_1(x_i + m, y_i + n) - f_2(x'_i + m, y'_i + n)\} \quad (6)$$

ただし $f_1(x, y)$ 、 $f_2(x, y)$ は、それぞれ画像1、画像2の座標 $(x, y)$ における画素の濃度を示す関数であるとする。

$a_i$ に対する対応点候補の中で、類似度 $e$ が設定したしきい値より小さく、かつ対応点候補中最小の点を対応点とした。この方法によりマッチングを行った例をFig.7に示す。白点が対応づけが得られた点である。

## 3.4 後処理

点の対応付けを行い、座標を計算しただけではマッチングのミスによると思われる座標計算のミスが多数発生していた。誤った点を減らすために、模擬ごみを投入したホップを写した画像について、画像中でごみの写っている範囲を画像処理によって抽出したものとホップの形状を考慮して、誤りと思われる点を削除した。その様子をFig.8に示す。

## 4 計測結果と考察

模擬ごみを順次ホップに投入していったときのホップ内のごみの表面形状測定例をFig.9に示す。ごみ体積は測定されたごみ表面形状を高さ方向に積算することによって計算した。

結果より、ごみの表面形状をおおよそ捉えることができたといえる。

ごみ投入1~3までは、それぞれごみを投入するとき90Lのポリバケツ一杯分のごみを投入したが、これを体積の計算結果と比較するとごみ体積の測定誤差は見かけ上2~3割程度であったということが出来る。しかし、シュート内のごみはごみを新しく投入した際、ごみ重さによって圧縮されると考えられるため、単純にごみ体積の計算結果を評価することはできない。

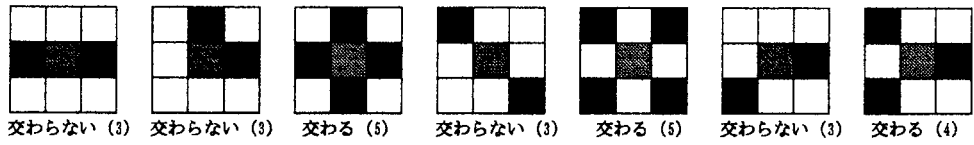


Fig.4 交点抽出のフィルタ

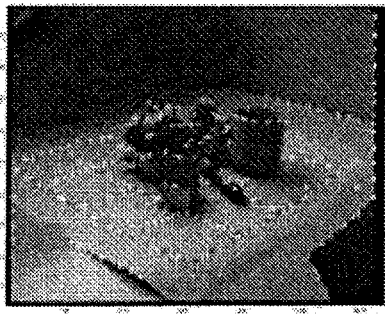


Fig.5 1)の方法による

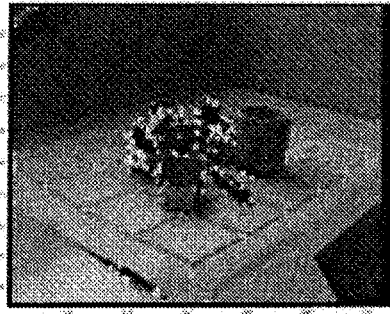


Fig.6 2)の方法による

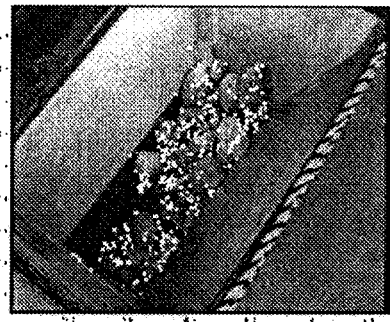
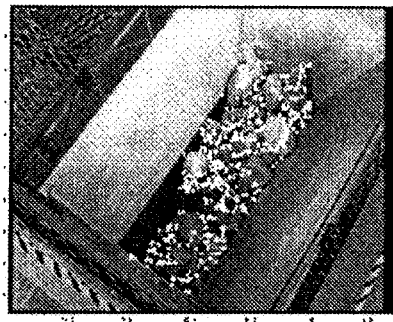


Fig.7 マッチングの結果 左:左カメラの画像 右:右カメラの画像

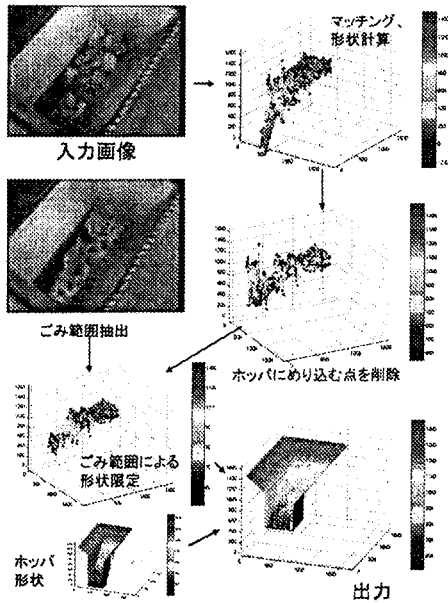


Fig.8 後処理の流れ

ごみ体積の測定誤差の主な原因のひとつに表面形状計測、すなわち座標計算の誤差や間違いがあげられる。座標計算のミスは、マッチングのミスのほか、入力画像の歪みやカメラの位置やカメラパラメータの与え方の不適正さに起因すると考えられる。表面形状計測の精度を向上させるためには、入力画像に対して十分なキャリブレーションを行い、さらにより多くの拘束条件を与えてマッチングを行うこと必要である。

以上は通常のカメラを用いて独自のプログラムにより表面形状を計測した結果であった。ところで、画像を用いたステレオ計測機器は、いくつかの製品が発売されており、たとえば pointgray 社の 3 視ステレオ計測システム「DIGICLOPS Stereo Vision System」は、カメラの相対位置やカメラパラメータ、画像の歪みの修正等のキャリブレーションがあらかじめ行われており、また、ステレオ計測におけるマスクサイズや対応画素の探索範囲、各種閾値などの設定が行えるうえ、比較的高速に計測を行うことができる。したがって、ハードウェア、ソフトウェアを上位のものに変えればより精度高くごみ形状が推定できると期待される。

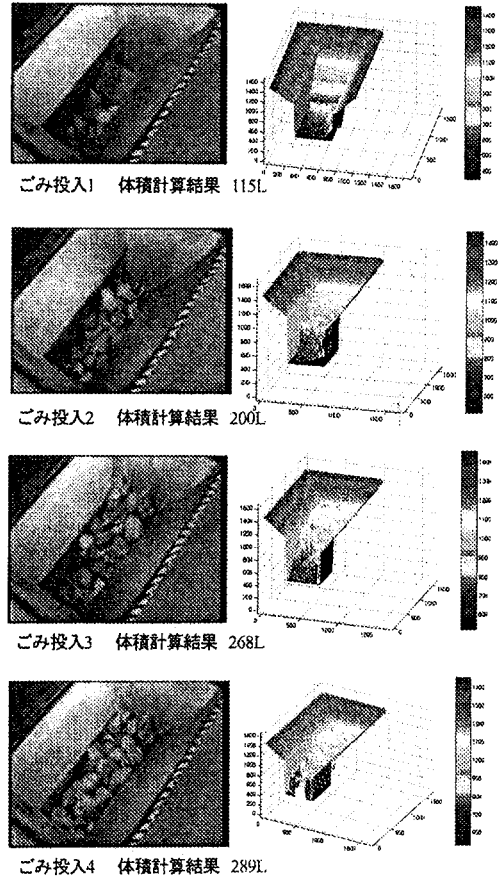


Fig.9 測定例

## 5 まとめ

提案した画像処理手続きにより、ホップ内のごみの表面形状をおおよそ捉えることができた。これにより、画像処理によるホップ内のごみの形状計測をごみ供給量予測に活かせる可能性を示すことができたと考えられる。しかし、計測の精度はまだ十分ではないため、正確にごみ供給量を求めるにはさらに処理の精度、速度を向上させる必要がある。

なお、今後は先に述べた既成のステレオ計測キットを用いてごみ供給量予測の研究を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 廃棄物学会 編: 廃棄物ハンドブック、オーム社 (1997)
- 2) 谷口慶治 編: 画像処理工学 基礎編、pp.41-52、p.173、共立出版株式会社 (1996)
- 3) 高木幹雄 下田陽久監修: 画像解析ハンドブック、pp.716-722、東京大学出版会 (1991)
- 4) 三谷商事株式会社: WinRoof リファレンスマニュアル、5-9
- 5) 三谷商事株式会社: WinRoof