

建設系廃棄物選別システムの開発

ロボットビジョンを応用した廃棄物判定手法による選別性能検証

中村 聡・上野 隆雄

近年、建設系廃棄物処理に関係する様々な問題により、解体工事をはじめとする排出者側での更なる廃棄物のリサイクル率向上、分別・選別作業の効率化、安全性向上などが求められている。これらの建設系廃棄物処理に関する課題を解決する手段の一つとして、廃棄物の画像から材質の判定を行い、得られた判定結果を基に自動選別する「建設系廃棄物選別システム」の開発を行っている。本報では、建設系廃棄物選別システムの概要および当該システムに使用したロボットビジョンの建設系廃棄物材質判定手法について述べると共に、実際の解体現場から発生した大きさ、形状が多様な廃棄物を使用した検証実験によって確認した建設系廃棄物選別システムの性能について報告する。

キーワード：解体工事，廃棄物選別，自動化，ロボットビジョン，ベイズ理論

1. はじめに

解体工事などから排出される建設系廃棄物は循環型社会の形成に向けた「建設リサイクル法」等によって適切な処理が義務付けられているのに加え、アスベスト等の有害物質処理や、環境に対する社会的関心の高まりにより建設系廃棄物の処理は更なる適正化、高度化を求められている。一方、解体工事や廃棄物中間処理施設における廃棄物の分離や選別作業は劣悪な環境で行われる場合が多く、作業者の労働環境面にも課題が残る。

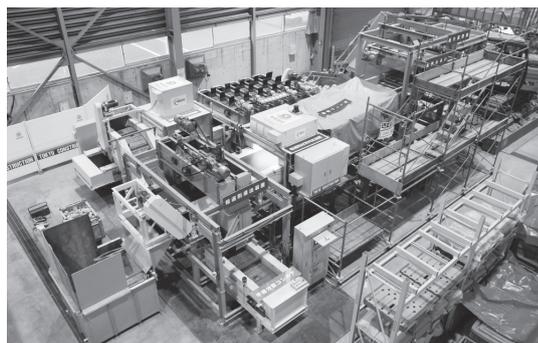
これらの課題を解決することを目的として、廃棄物の画像から得られた「色」、「形状」、「表面質感」の3つの独立した判定要素から得られた各判定結果をベイズ理論により統合し、複数の判定要素から最終的な材質を判定するロボットビジョンの開発を行った。このロボットビジョンを応用し、判定結果から材質毎に選別を行う建設系廃棄物選別システム（以下、選別シ

テム）のプロトタイプ機を製作した（写真—1）。本報では、選別システムの概要や材質判定手法、解体工事で採取した廃棄物で検証した性能について報告する。

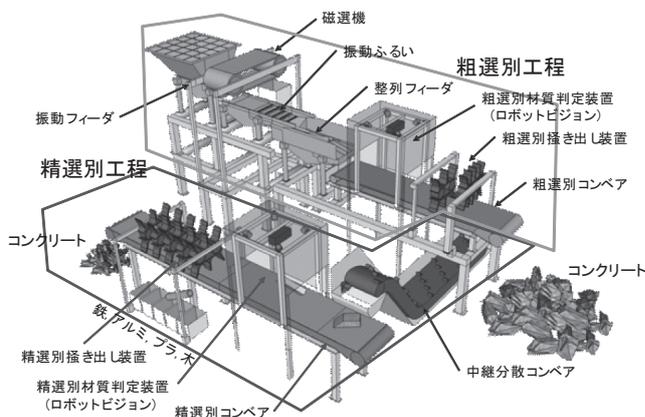
2. 選別システムの概要

(1) 建設系廃棄物選別フロー

非木造建物の解体工事から排出される廃棄物は全体の85%以上がコンクリート、残りの約15%がコンクリート以外の廃棄物（以下、他の廃棄物）で構成される^{1), 2)}。そのため、コンクリートに混入する他の廃棄物を効率良く抽出することで、システム全体としての選別速度が向上すると考え、選別システムでは選別工程を粗選別工程と精選別工程の2つの選別工程に分けて動作を行う仕様とした（図—1）。



写真—1 選別システム



図—1 選別工程および要素

①粗選別工程

選別システムに投入された建設系産業廃棄物から、コンクリートに混入する他の廃棄物のみを判定・選別することで、廃棄物の処理量を重視した効率の良い選別動作を行う

②精選別工程

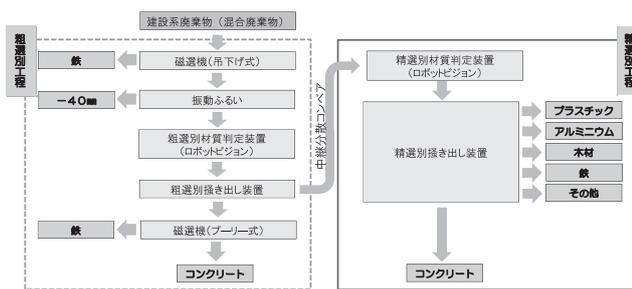
粗選別工程で抽出した廃棄物を更に細かく選別するため、一定間隔に整列させた廃棄物を材質判定し、鉄、アルミニウム、プラスチック、木材、コンクリートの5種類に選別を行う

重機によって投入された廃棄物は、磁選機や振動ふるいにより容易に選別可能である鉄や、画像を使用した材質判定に影響を与える40mm以下の廃棄物を取り除いた後、粗選別と精選別の2つの工程に組み込まれた材質判定装置の判定結果を基に掻き出し装置(写真一2)により品目毎に選別される。選別システムの廃棄物選別フローを図一2に示す。

製作した選別システムに投入可能な廃棄物寸法は、中間処理施設におけるコンクリート塊の受け入れ可能寸法と再生砕石の規格を基準に設定した。また、処理



写真一2 掻き出し装置



図一2 廃棄物選別フロー

表一1 選別システムの仕様

項目	仕様	備考
投入可能寸法 (mm)	40 ~ 300	
選別材質	コンクリート塊, 鉄くず, 木くず, アルミニウム, 廃プラスチック, その他	「その他」材質は都度設定
選別能力 (m ³ /h)	8	投入量換算
装置寸法 (m)	L12.0 × D8.6 × H4.7	粗選別工程 + 精選別工程
質量 (kg)	約 20,600	粗選別工程 + 精選別工程
電源	3相 200 V 30 kWh	

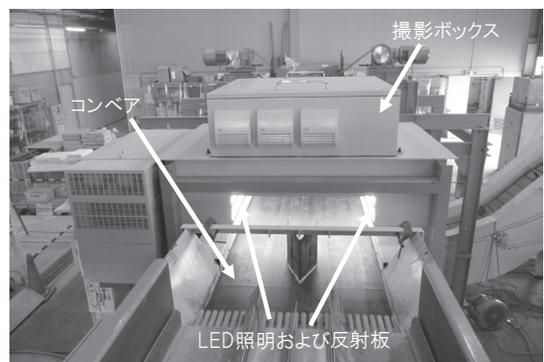
能力は4か所の解体現場から排出された廃棄物量を調査し、1日に必要となる平均処理量から求めたものである。選別システムの仕様を表一1に示す。

廃棄物をリサイクルするためには回収する廃棄物に他の材質が混入する事を極力避けなければならないが、画像処理による材質判定精度や選別機の能力、建設系産業廃棄物のリサイクルの現状などを考慮し、当面の目標として対象となる5種類の廃棄物を材質毎に選別する確率(以下、抽出率)を60%に設定した。

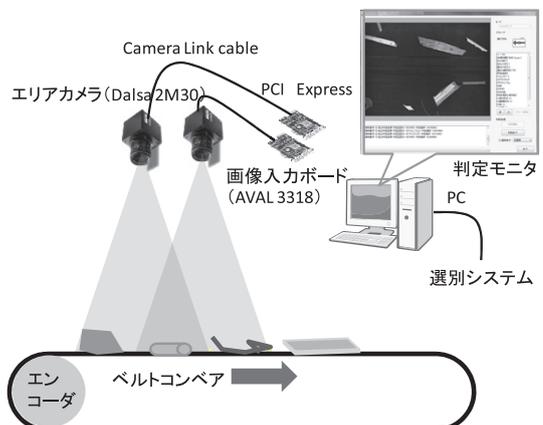
(2) ロボットビジョン

外乱による材質判定の精度低下を避けるためコンベア上の撮影範囲を覆うように設置された撮影ボックス内部にLED照明と反射板、撮影ボックスの上部にカメラを配置し(写真一3)、拡散光で照射したコンベア上の廃棄物をコンベアが任意に設定した距離を移動する毎に撮影を行う。また、撮影した廃棄物が撮影範囲を超えた場合に画像情報を補完するため、2台のエリアカメラを撮影範囲が一部重なるように配置した。取得した2つの画像を使用してコンベア上を移動する廃棄物の材質判定を行い、判定結果と重心位置の座標データを掻き出し装置に送信する(図一3, 4)。

画像による建設系産業廃棄物の材質判定を行うた



写真一3 ロボットビジョン



図一3 ロボットビジョンの概要

メインカメラの画角から外れた範囲をサブカメラで補完

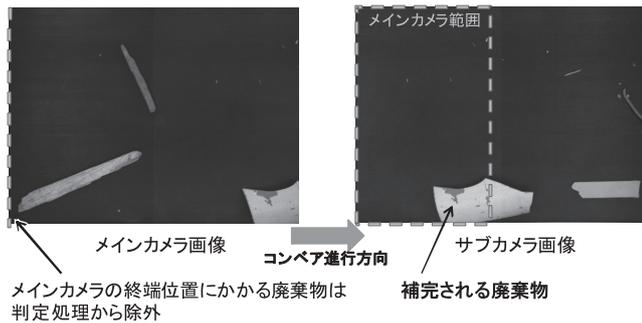


図-4 ロボットビジョンの画像

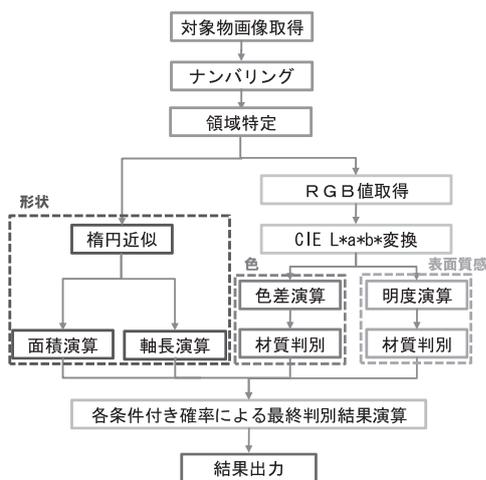


図-5 材質判定フロー

め、廃棄物の色、形状、表面質感の各パラメータでそれぞれ判定された結果から、ベイズ理論³⁾に基づき最終的な材質を推定する(図-5)。

この選別システムでは、材質判定結果を事後確率の最も大きい材質とし、解体現場から採取した廃棄物サンプルから色、形状、表面質感の判定基準値を設定し、各パラメータの条件下における同時分布を実験により求めた。事前確率は最初の判定パラメータに選別システムの機能や選別する廃棄物の割合、廃棄物の抽出目標から定め、以降は直前に判定を行ったパラメータの事後確率が次のパラメータの事前確率として設定している。規格化するための定数は各パラメータの条件下で廃棄物が目的とする材質に判定される割合とした。

この材質判定システムでは以下に示す手順で画像処理とベイズ理論による推論を行うが、実際の廃棄物選別では、撮影範囲内の廃棄物とコンベアの汚れや、選別に適さない微小な廃棄物を分けるため、明度が閾値以下の領域に対しては3)以降、面積が閾値以下の領域に対しては4)以降の処理を行わない。

- 1) コンベアの移動距離に応じて出力されるカメラの撮影トリガにより廃棄物画像を撮影

- 2) 二値化処理で背景と廃棄物領域を分離
- 3) ナンバリング処理による廃棄物領域特定
- 4) 各領域内のRGBを取得し、CIE L^*a^*b に変換
- 5) 各領域内のメトリック色相角を求め、領域内で頻度が最も高い角度との差が閾値以内の画素のみでメトリック彩度の平均値を算出
- 6) メトリック彩度における各材質の基準値と判定対象廃棄物平均値の差を算出し、差に応じた各材質の同時分布確率を決定
- 7) 各領域内の明度をラプラシアンフィルタ処理し、平均値を算出
- 8) 各材質の基準点と、7)で算出した領域内の明度平均値のマハラノビス距離を算出し、最も距離の近い材質を表面質感による材質判定結果として表面質感の同時分布確率を決定
- 9) 各領域に楕円を近似させ、楕円の長軸・短軸の長さ比と、楕円と領域の面積比を演算
- 10) 長さ比と面積比が閾値を超えた場合、形状の同時分布確率を変更
- 11) ベイズ理論により色、形状、表面質感の同時分布確率から事後確率を求め、最終材質判定結果を出力

手順5)は廃棄物表面の最も面積の多い色彩によって材質判定を行う事で、汚れによる判定誤差を減らしシステムのロバスト性を高めるために行っている。また、CIE L^*a^*b におけるクロマティックネス指数の基準点を複数設定することで水濡れ等による変色や、色の種類が多い材質にも対応できるようにした。

手順8)で廃棄物の領域に近似させた楕円の中心を平面的な重心位置と仮定し、得られた重心位置座標は材質判定結果と共に設定時間毎に選別システムに送信される。

3. 選別システムの性能

(1) 選別精度

選別システムの選別精度を検証するため、解体現場から採取した5種類の廃棄物サンプル(コンクリート、アルミニウム、プラスチック、木材、鉄)を選別システムにバックホウで投入し、選別を行った際の抽出率を計測した。投入する廃棄物サンプルは、解体現場における廃棄物排出量の調査結果に合わせコンクリート85%、他の廃棄物15%の割合となるように、0.25 m³のコンクリートに鉄、アルミニウム、プラスチック、木材を各30個混入させたものを使用した。この実験

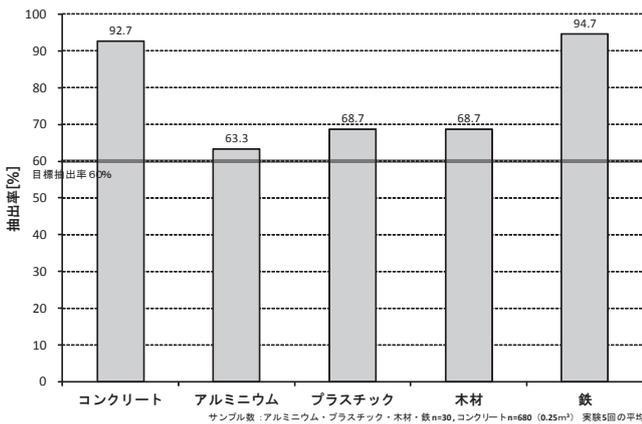


図-6 選別システム抽出率

によって求めた選別システムの抽出率を図-6に示す。図-6は内容の異なる廃棄物サンプルを投入する実験を7回行い、最も精度の高い回と低い回を除いた5回の平均値から抽出率を求めた結果である。

図-6から、ロボットビジョンを使用した選別システムによって目標としていた抽出率60%が達成できることを確認した。しかし、表面に汚れが付着しているアルミニウム製の建材とプラスチック製の建材のように人間でも見た目だけでは判断するのが難しい廃棄物や、コンベア上で重なり合った廃棄物については誤判定により取り違える傾向にあった。また、粗選別工程では正しく材質判定されていても、掻き出し装置によって正確に抽出できないケースもあった。

(2) 判定精度

材質判定システムの判定精度を検証するため、選別システムの選別精度を検証実験した際に、粗選別工程で選別した廃棄物を精選別工程で材質毎に判定を行ったデータから判定結果の妥当性を検証した。実験ではベイズ理論に基づく推定法における事前確率を5種類全て同じ値とし、「その他」の判定結果が発生しない設定とした。図-7に5種類の廃棄物を材質判定し

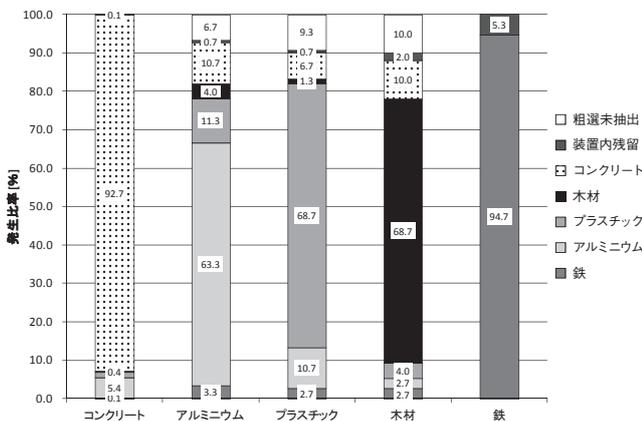


図-7 材質判定比率

た時の発生比率を示す。

検証実験の結果では、形状に特徴のあるコンクリートと鉄鋼（鉄筋）は90%以上の確率で判定ができています。しかし、プラスチックはアルミニウムやコンクリート、アルミニウムはプラスチック、木材はコンクリートにそれぞれ10%程度誤判定している。この結果から、更なる選別精度向上には誤判定する確率が高い品目との判定パラメータの基準値や同時分布確率の見直しが必要であると考えられる。

(3) 騒音, 振動

選別システムには振動フィーダなど廃棄物を振動させて移送や篩分けを行う装置が組み込まれているため、解体現場等の屋外環境で使用する事を考慮した選別作業時の騒音、振動の計測を行った。騒音および振動レベルの計測は屋外で行い、計測データから得られたパワーレベルから振動予測を行うための係数と、85dB以下の騒音レベルとするために必要な離隔距離を求めた。

選別システムの予測点における振動レベルは式(1)で求められる。

$$Lvr = 79.1 - 15LOG_{10}r - 8.68a(r-1) \tag{1}$$

r: 振動発生源から予測点までの距離 (m)

a: 内部減衰係数 (0.01 ≤ a ≤ 0.04)

選別システムから発生する騒音レベルが騒音規制法に規定される85dB以下とするためには、装置中心から7.9m以上の離隔距離が必要である。

(4) 耐環境性

選別システムが日照や降雨降雪などの屋外環境において正常に動作可能であるか検証するため、解体現場を想定したフィールド実験を行った(写真-4, 5)。



写真-4 散水実験



写真一5 降雪時の選別実験

実験では太陽光による外乱や影の発生，降雨または散水による各機械要素の耐久性，水による廃棄物の変色等が選別に影響するか検証した。

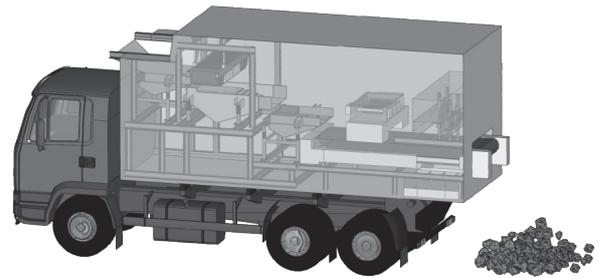
検証の結果，降雨や降雪，散水によって廃棄物の色の変化しても選別精度検証時と同程度の選別性能が得られることを確認した。掻き出し装置やコンベア等の動作についても問題ないことを確認した。

4. おわりに

廃棄物発生の上流に位置する建物解体工事において廃棄物選別作業の効率化や安全性向上を目的としてロボットビジョンを応用した選別システムの開発に取り組んだ。性能検証を行った結果，開発した選別システムが目標とする選別精度などの各種性能を達成できることを確認した。

しかし，解体現場から排出される建設廃棄物は色や形状が多様であるため，更なる材質判定精度向上を目指すには新たな判定要素の設定などが必要である。また，廃棄物を確実に抽出するためのマニピュレータ等についても検討課題の一つである。

今後，解体現場での実用化を考慮し，選別システムをユニット化することで現場での移動や設置の負担を軽減し，騒音や振動を考慮した新たな選別システム(図一8)の開発に取り組み，循環型社会の推進に寄与していきたいと考えている。



図一8 車載型選別システムイメージ

謝辞

本研究は，NEDO 技術開発機構からの研究委託「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト（特殊環境分野）建設系産業廃棄物処理 RT システムの開発」で実施したものであり，ご指導いただいた千葉工業大学の平井成興氏をはじめ多数の関係者の皆様に謝意を表します。

JICMA

《参考文献》

- 1) 後久卓哉・遠藤健 他7名：次世代マニピュレータによる廃棄物分離・選別システムの開発，第9回システムインテグレーション部門講演会(SI2008)，pp.279-280，2008
- 2) 柳原好孝 解体現場用廃棄物分離・選別システムの開発，建設の施工企画，pp.36-40，2009年4月
- 3) C.M. ビショップ：パターン認識と機械学習(上)，シュブリンガー・ジャパン，pp.20-47，2007年12月

【筆者紹介】



中村 聡 (なかむら さとる)
東急建設
技術研究所 メカトログループ



上野 隆雄 (うえの たかお)
東急建設
技術研究所 メカトログループ