

解体現場用廃棄物分離・選別システムの開発

—次世代マニピュレータと廃棄物判定手法による RT 施工システムの構築—

柳原好孝

建築物解体現場において必要とされている作業の効率化、安全性向上、循環型社会の実現に向けた廃棄物のリサイクル向上を目的に、新たな解体工法を構築する技術として「次世代マニピュレータによる廃棄物分離・選別システム」を提案し、その構成要素について研究開発を実施した。

今回、廃棄物の分離・選別する技術を確認するために開発した、「次世代マニピュレータ」、「廃棄物判定手法」、「現場環境計測技術」を中心に開発内容とその要素技術ごとの機能、性能について記す。また、これら構成要素技術を搭載して実施したフィールド実証実験結果をもとにその有用性について述べる。

キーワード：解体工事、廃棄物処理、RT、マニピュレータ、自動化、安心安全

1. はじめに

「日本建設機械要覧 2007」¹⁾によると平成 16 年以降に発表された最近の建設ロボットの開発事例では、単体で機能するロボットではなく、IT 技術を活用したネットワーク型システムが主流となっている。また、社会的要請から、「リニューアル」や「解体」を対象としたロボット開発も増加している傾向にある。この中で「解体」については、焼却施設の解体（施設本体と煙突）が大半を占めているが、今後は都市部において現行の基準（耐震基準や環境基準）に合わない老朽化した一般建築物の解体工事が増加すると予想され、解体工事を安心安全であり、且つ効率よく実施できる新たな解体技術が求められてきている。

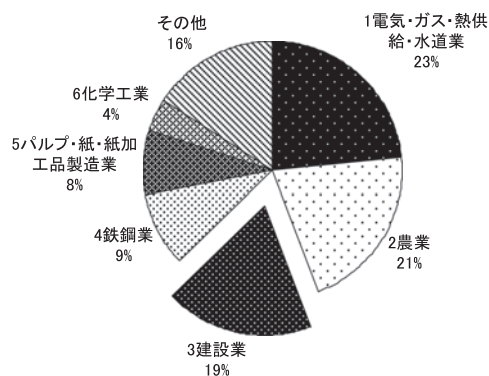
このような背景から、筆者らは解体工事の市場、廃棄物処理の現状調査結果をもとに、解体工事に必要とされる新たな施工機械として、廃棄物の分離作業を行う双腕型の「次世代マニピュレータ」と廃棄物を素材毎に選別を行うための「廃棄物判定手法」を開発した。さらに、解体現場にネットワーク環境を構築し、「現場環境計測技術」による周辺住民の安心安全などこれら解体現場の IT、RT²⁾ 化技術についても併せて紹介する。

2. 解体工事市場および廃棄物処理の現状

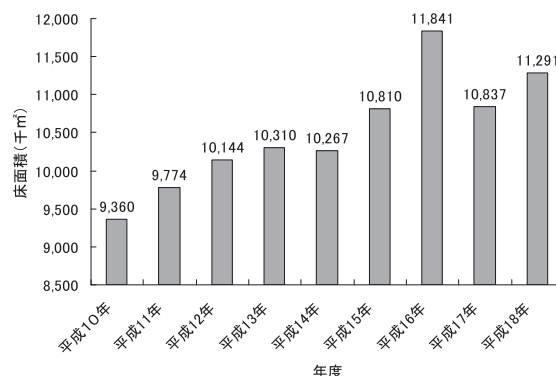
(1) 解体工事市場

ここ数年、産業廃棄物排出総量は約 4 億万トンで推

移しており、そのうち建設廃棄物は約 2 割（図—1）を占める³⁾。また、建設系産業廃棄物を多く排出する建築物（非木造）の解体件数は、増加の傾向があり平成 18 年の統計⁴⁾では 35,864 棟、床面積では 11,291（千㎡）となっている（図—2）。さらに平成 14 年から施行されている建設リサイクル法に基づき、コンクリー



図—1 産業廃棄物排出割合



図—2 除却建築物数推移

表一 解体現場の廃棄物排出割合

(t)					
コンクリート	アスコン	ガラス陶磁器	廃プラスチック	金属くず	木くず
1095839.73	17018.48	3387.868	2250.379	129465.89	8264.255
85.91%	1.33%	0.27%	0.18%	10.15%	0.65%
紙くず	繊維くず	石膏ボード	畳	生木・伐根	A L C
170.502	90.074	2835.132	49.83	266.62	191
0.01%	0.01%	0.22%	0.00%	0.02%	0.01%
スタイロ	木毛板	廃アルカリ液	混合廃棄物	石	発生量計
32.3	1.6	7.06	15134.49	14	1275634.2
0.00%	0.00%	0.00%	1.19%	0.00%	100.00%

出典：社団法人建設業協会，建築物の解体に伴う廃棄物の原単位調査報告書

ト塊等の建設廃棄物のリサイクルの推進や，アスベスト等有害物質の処理等，解体工事に求められる技術は高度化・複雑化してきている。

(2) 解体現場の廃棄物排出割合

このような市場の要求から作業所では分別率向上への取り組みとして，産業廃棄物中間処理業者，現場職員と協力者をあわせた教育を継続的に行っている⁵⁾。また，非木造建築物の解体時に発生する廃棄物について(社)建設業協会（副産物部会）が行った「解体に伴う廃棄物の原単位調査」における調査結果（表一）⁶⁾によると発生品目数 17 のうち躯体解体時に発生するコンクリート 85.9%，金属くず 10.2% の 2 品目で全体の 96% を占め，躯体解体時に多くの廃棄物が発生している。

3. 廃棄物分離・選別システムの開発

(1) 開発シナリオ

都市部，特に地上の空きスペースが少ない高層建築物解体の場合，階上解体工法が採用されるケースが増加傾向にある。ここで使用されている重機は，主に躯体

体を大きく解体する「大割機」と呼ばれるもの，廃棄物を現場から搬出可能なサイズおよび素材ごとに分離選別する「小割機」，搬出階でトラックに廃棄物を積み込む「積込機」で構成されるのが一般的である。大割機と小割機を階上に吊り上げ，上層階から順次下層階へ躯体解体および廃棄物の分離・選別作業が進められる。

本研究開発では，これら重機のうち小割機が担当する分離作業を見直し，効率向上を図る「双腕マニピュレータ」と，廃棄物の搬出階での選別率向上を目指し「廃棄物材質判定移送装置」の開発を目標とした。

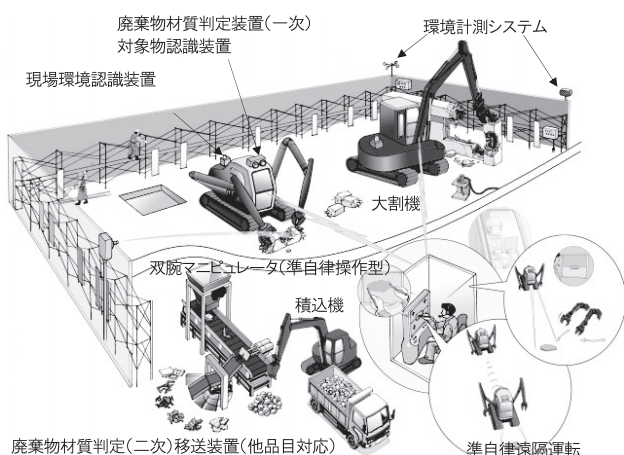
開発フェーズを 3 段階に分け，フェーズ 1 では，「搭乗運転型双腕マニピュレータ」と「廃棄物移送装置」を現場導入することを目標とし，フェーズ 2 では遠隔操縦化，フェーズ 3 では，準自律運転を目指すことにした（図一 3）。

(2) 次世代マニピュレータ

(a) 双腕マニピュレータ

次世代マニピュレータの概観を図一 4 に示す。本体の開発にあたり油圧駆動システムと制御システム，およびマニピュレータの自由度構成について検討を行った。

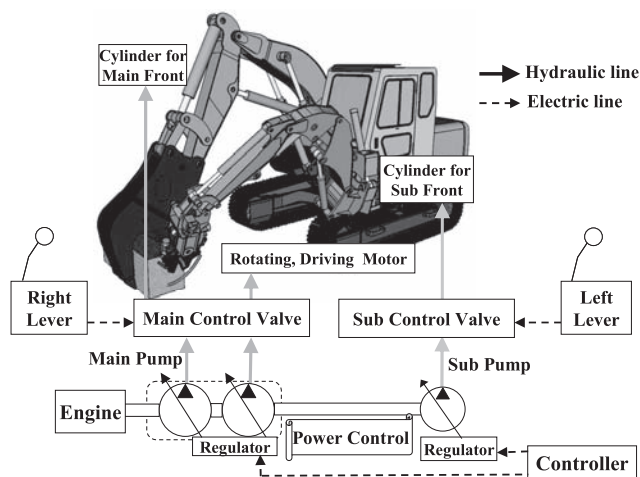
図一 5 にマニピュレータ本体の駆動制御システムを示す。ベース部は，11 t クラスの油圧ショベルである。



図一 3 解体工場のイメージ (フェーズ 3)



図一 4 双腕マニピュレータ



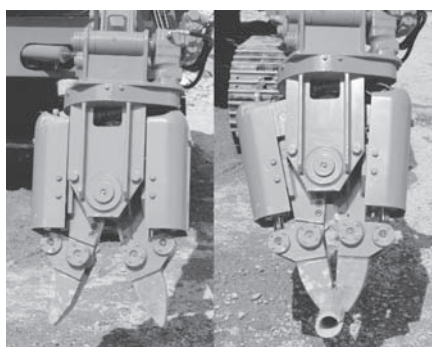
図一五 駆動制御システム

作業分析結果から、右腕（主腕）には従来の作業機と同等の出力および作業効率を確保させるため、ベース部の油圧駆動システム及びエンジンをそのまま使用する。一方、左腕（副腕）の油圧駆動システムは3tクラス油圧ショベルのシステムを搭載し、副腕駆動用ポンプをベース機のポンプに直列に接続する。また、左右腕を同時に最大出力で動作させるとエンジン出力が不足するため、同時駆動する場合は副腕側の操作信号及び作業負荷に応じてエンジン出力を左右のマニピュレータに配分する馬力配分制御方式とした。

次に、マニピュレータの自由度構成については、出力重視としている主腕を標準的な油圧ショベルの持つピッチ3自由度に、アタッチメント旋回・開閉を加えた合計5自由度という必要最小限の構成とした。器用さを重視した副腕はロールを含む6自由度のマニピュレータ構成とし、アタッチメントと合計して9自由度とした。

(b) 多機能ハンド

主腕に求められる機能はコンクリート塊の小割りなど、既に市場で評価されているハンドで十分な作業性があることが判明した。しかし、副腕ハンドに求められる機能は、つかみ、切断、曲げなど細かな作業で、



図一六 多機能ハンド

しかも主腕との協調動作に対応する必要性があり、新たな多機能ハンドを開発した。

開発したハンドを図一六に示す。このハンドは、φ25 [mm] 相当の鉄筋や鉄骨など長尺ものを切断する機能、およびアルミサッシ枠や木材を躯体から剥がすなど、先端で細かな作業を行える機能を有する。さらに主腕との協調動作で引抜き、折曲げ、捻りなどの作業が可能である。

(c) ハンドリング動作計画システム

双腕マニピュレータを安全に動作させる、さらには遠隔操縦時や準自律運転時のオペレータ支援に有効な情報技術として、「ハンドリング動作計画システム」の開発を目指している。

ハンドリング動作計画とは、双腕マニピュレータを動作させる際、各種内外界センサにより情報を取得、動作制御を行うことを指し、以下の3つのシステムの実装を想定している。

- ① 把持対象物の材質判定による把持力制御
- ② 把持対象物の質量計測による移送速度制御
- ③ 軌道生成のための把持対象物幾何学推定

①は、把持対象物の強度に合わせマニピュレータの把持力を制御するもので、例えばコンクリートは強く把持することで移送中の落下を防ぎ、プラスチックは把持するときに壊さないなどの細かなハンドリングが可能となる。

②は、把持対象物の質量を計測することで、最適な移送速度を制御するもので、重量物である鉄はゆっくり、木材は速くなどの制御を行う。

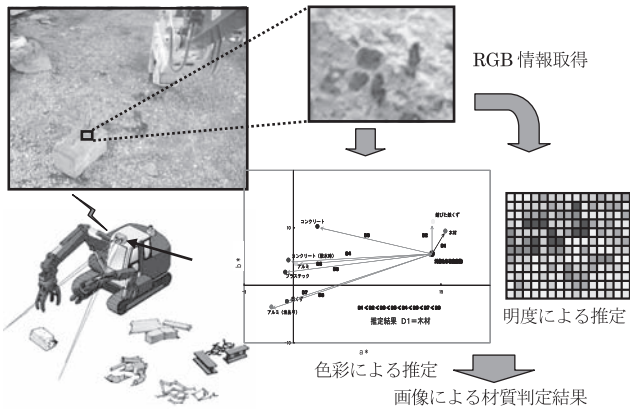
③は、把持対象物の位置、姿勢、体積、形状などの幾何学情報を取得し、把持対象物までのマニピュレータの走行、ハンドリングを準自律で行うための技術と位置付けている。

(3) 廃棄物判定手法

2項の調査結果から、今回の選別対象を、コンクリート塊、鉄くず、アルミくず、木材、廃プラスチックの5品目に設定した。設定した5品目の材質を判定するため、画像処理による判定と、各種センサ類を複合的に使用した判定システムの二通りの手法を構築した。

(a) 画像処理による判定

カメラ画像から得られた廃棄物形状をもとにして材質判定を行う場合、大きさや形が一定ではないためにパターンマッチングのように登録している形状と照合して廃棄物を特定することは膨大なデータベースを必要とするため判定処理に時間を要するなどの問題があ



図一七 画像による材質判定手順

る。さらにカメラ画像から得られた色の情報のみを基に判定すると、粉塵などの影響により異なる材質の色が酷似することや、降雨や錆などの影響により材質の色が変化することがあるため、色の情報のみを使用して廃棄物を精度良く判定することも難しい。

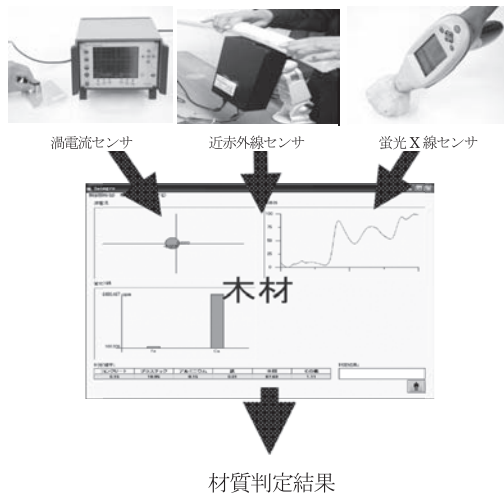
そこで、廃棄物画像の色や形状による判定に新たに廃棄物表面のザラザラやツルツルなどの質感を判定要素に加えることで、廃棄物のような対象物にも有効なロバスト性の高い判定手法の開発を行った。開発にあたり表面の質感を色による材質判定の重み付けとして使用し判定結果を出力することとした。

材質判定手順を図一七に示す。

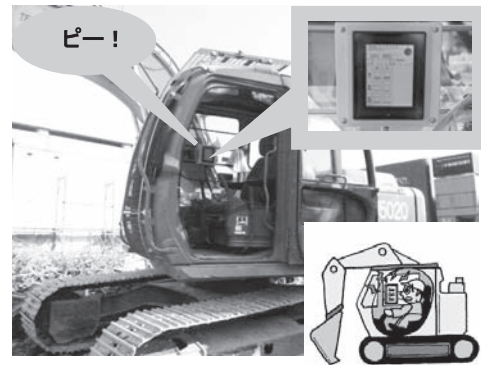
なお、同技術は、廃棄物判定移送装置の一次判定と前述のハンドリング動作計画システムで使用する保持対象物の材質判定に使用する。

(b) センサ群による詳細判定

カメラ画像による材質判定では困難な高精度の判定を行うため、さらに近赤外線センサ、渦電流センサ、蛍光X線センサを複合的に使用した材質判定手法を開発した。



図一八 センサ群による材質判定



図一九 環境情報提示

近赤外線センサにより対象廃棄物が「プラスチック」, 「木材」, 「その他」を判定し、渦電流センサにより「鉄」, 「アルミ」, 「その他」を判定、蛍光X線センサにより「コンクリート」, 「鉄」, 「その他」を判定する。

上記3つのセンサから出力される各判定結果をセンサ統合ソフトウェアが収集し、演算後、最終判定結果である「コンクリート」, 「鉄」, 「アルミニウム」, 「プラスチック」, 「木材」, 「その他」のうち何れかの結果とその判定確率を出力するシステムとした。

図一八に判定状況と結果表示例を示す。

(4) 安心、安全技術

建設現場は、一般的に関係者以外は立ち入りが制限され、内部でどのような作業が行われているか住民に伝わりにくい。特に解体工事を代表とする振動や騒音の発生が多い工種では、安心安全の観点からも施工者側の対応が必須であると言える。

このようなことから建設現場周辺住民へのリスクコミュニケーションとして、騒音や振動等を計測しデータを開示するようになってきた⁷⁾。しかし、騒音や振動の発生源となる可能性の高い作業中の建設機械に、計測した情報が直接伝わらず、規制値を超えた作業を行った場合でも騒音や振動を抑制するまでに時間を要していた。

本開発では、このタイムラグに着目し、抑制までの時間を短縮することを目的に、解体現場から発生する騒音や振動などを複数点で計測し、計測データの集積、演算処理や、周辺住民、重機オペレータ、現場事務所への通知機能を有し、発生源である重機の出力制御を行う拡張性を持つシステムの開発を行った。

オペレータへの提示状況を図一九に示す。



図一 10 実証実験状況



図一 11 操作状況

4. 評価実験

図一 10 にテストフィールドでの実証実験状況を示す。油圧ショベルに専用のアタッチメントを取り付けた大割機（写真奥）と呼ばれる破碎機が、梁、柱、壁などの躯体をブロック状に分解し、次工程を担当するマニピュレータ（写真手前）に受け渡す。マニピュレータは、廃棄物を素材ごとく分離、選別する作業を行う。この実際の解体現場と同様の作業を繰り返し行うことで、マニピュレータの不具合箇所の抽出を行った。さらにオペレータに機械仕様に関する満足感、操作システムの使い勝手などについてヒアリングを実施した。マニピュレータ操作状況を図一 11 に示す。

ヒアリングの結果、マニピュレータの操作速度、可動範囲、出力については細かな改良点があるものの、おおむね現状の仕様で問題が無いとの回答を得た。一方、操作システムについては主腕のアタッチメント開閉、副腕の多機能ハンドの開閉が他の操作と同時操作できないなどの問題点もあり、改善要望が複数名から指摘された。

次に、判定手法については、センサ群による詳細判定で現状どの程度の選別率にあるかを測定した結果、

条件により異なるがおよそ 65% 以上の判別精度を得ることができた。

5. 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分離・選別の一連の作業の効率化、再資源化を目的に施工システムの RT 化に取り組んだ。

その理由として、解体工事は一部の作業のみを効率化しても工期全般を短縮することが難しく、作業環境（機械周辺）の整備も含めたシステムの構築が必要であったからである。

さらに建設副産物のリサイクル率向上は、社会的な要請として果たさなければならない施工者の義務であり、今回紹介した技術などを駆使することで循環型社会の推進に寄与していきたいと考えている。

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、共同実施者の日立建機株式会社、ならびにご指導いただいた独立行政法人産業技術総合研究所知能システム部門長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) (株)日本建設機械化協会：日本建設機械要覧 2007
- 2) 日本ロボット工業会：21 世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略調査報告書，2001 年
- 3) 環境省 HP：産業廃棄物の排出及び処理状況等（平成 18 年度実績）
- 4) 国土交通省総合政策局情報管理部建設調査統計課：建設統計要覧，（助建設物価調査会
- 5) 児玉英夫，高橋誠二，金井義博：産廃分別によるコスト削減効果事例一誰でも出来る現場分別成功の秘訣一，東急建設環境発表会，2004
- 6) 社団法人建設業協会：建築物の解体に伴う廃棄物の原単位調査報告書，2002
- 7) 新原光男，ほか 4 名：ごみ処理施設解体における環境計測及び管理手法について，東急建設第 6 回環境発表会，2005

【筆者紹介】

柳原 好孝（やなぎはら よしたか）
東急建設
技術研究所
メカトログループ

