次世代型建設作業用マニピュレータによる 建設系産業廃棄物処理 RT システムの開発

柳 原 好 孝^{*1} 後 久 卓 哉^{*1} 遠 藤 健^{*1} 中 村 聡^{*1}
上 野 隆 雄^{*1} 小 俣 貴 之^{*2} 石 橋 英 人^{*2} 富 田 邦 嗣^{*2}

Development of the Construction Waste Management RT System with the Use of Next-Generation Manipulator

Yoshitaka Yanagihara^{*1}, Takuya Gokuyuu^{*1}, Ken Endou^{*1}, Satoru Nakamura^{*1},
Takao Ueno^{*1}, Takayuki Omata^{*2}, Hideto Ishibashi^{*2} and Kunitsugu Tomita^{*2}

Authors had suggested the “Construction Waste Divide and Select System by a Next-generation Manipulator” in order to improve work efficiency, safety and recycling rate of building demolition, also developed element technologies.

This paper shows contents of development technologies, “Next-generation Manipulator”, “Handling Planning System” and shows function and performance of those. A result of field tests and effectiveness of these technologies based on a test result are also explained.

Key Words: Construction Robot, Manipulator, Waste Management, Object Recognition

1. は じ め に

循環型社会の実現に向け、国、企業、個人の様々な立場において、製品が廃棄物として処理されることを抑制し、3R [1] を促進することが求められている [2]。このようななか、高度成長期に建てられたビルなどの建築物は耐用年数に近づいていたり、あるいは現在の耐震基準に合わないものもあって、その解体需要は年々増加している [3]。つまり、解体現場で発生する建設副産物が有効活用され、可能な限り廃棄物として処理されないことが社会的に求められている。

現在、建物の解体は、内装解体、アスベスト除去、躯体解体の手順で行われており、建設副産物の発生量は、躯体解体時に発生するものが最も多い。この躯体解体は、腕の長い解体機を使用した地上からの解体が一般的に行われているが、今後は解体対象建物がより高層化すること、都市部では地上の作業スペースが確保できないなどの理由から、階上に載せた建設機械で解体する工法 [4]（以下、階上解体工法）の採用が増加すると予測しており、階上での解体物の分離・選別が処理の最上流の作業となる。

ここで発生する建設副産物は、最も多いものがコンクリート

塊で、次に鉄筋鉄骨などの鉄くず、アルミくず、木材、廃プラスチックなどが続く。これらを分離・選別するに際し、現状の問題点として以下のものが挙げられる。①細かな分離・選別に限界があり、混合廃棄物の発生を低減できない、②減容化に時間を要する、③解体機周辺の作業員による選別は危険性が高い、④崩落、転落などの危険がある、などである。

ところで、このような解体工事で使用される建設機械は、元々土砂を掘削するために開発された油圧ショベルをベースとした設計思想を基本とし、製造されている。つまり先端に装着するアタッチメントを選択することで、解体作業を含む様々な用途に対応することが前提とされている。しかしながら近年、物を掴んだり移動させたりするいわゆるハンドリング機として使用されるケースが多くなっており、土砂を掘削することを前提として設計された油圧ショベルでは、前後上下方向には力を発生できるが左右方向に力を発揮できない、自由度が不足するなど制約を受けているのが現状である。

このような社会的背景、建設作業用のハンドリング専用機開発の必要性から、新設計の双腕マニピュレータを核とした建設系産業廃棄物処理 RT システムを開発した。本論文では、廃棄物の分離・選別が可能な「次世代型建設作業用マニピュレータ」の概要、さらに将来の建設機械の遠隔操縦化や自律化を視野に入れた「ハンドリング動作計画システム」の開発内容とその要素技術ごとの機能、性能について示す。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。

原稿受付 2008 年 12 月 19 日

^{*1}東急建設（株）

^{*2}日立建機（株）

^{*1}Tokyu Construction Co., Ltd.

^{*2}Hitachi Construction Machinery Co., Ltd.

■ 本論文は有用性で評価されました。

2. 次世代型建設作業用マニピュレータ

解体現場の廃棄物処理 RT システム構築に向け、実際の解体現場の実態調査ならびに作業分析を実施し[5]、この結果を基に適用範囲、処理対象物、開発対象とした次世代型建設作業用マニピュレータ（以下、マニピュレータ）に求められる機能、性能を設定した。

まず適用範囲については非木造建築物の階上解体工法における躯体解体作業とした。これは調査の結果、他の解体工程（内装解体、アスベスト処理）に比べ大量の建設副産物を安全、かつ効率的に分離、選別することが取り組むべき最重要課題であると判断したことによる。

次に処理対象物については躯体解体時に発生する建設副産物のうち、全体の80%以上を占めるコンクリート塊、有価物の鉄、アルミ、他の素材料と混合されたまま排出されると問題となる木材、廃プレスチック類の5品目とした。

RT システム適用の全体イメージを **Fig. 1** に示す。

ここで本研究の開発対象を、建物を大きくブロック状で解体する「大割機」と呼ばれる在来機から複合部材を受け渡されたあと、これらを素材料ごとに分離、選別する役割を担う部分とした。現在この作業は「小割機」と呼ばれる機械と2、3名の手元作業員により行われているが、不安定な場所での危険を伴う作業であり、オペレータ以外の作業員を配置することを避けたいという考えと、現行の小割機並みの出力を持ち、人が行っている細かな選別作業のいずれもに対応可能な多機能マニピュレータを開発導入することで安全性、効率の向上を目指すことにした。

なお、本稿では述べないが建設副産物を現場から搬出する前に地上階に新たに配置する廃棄物材質判定移送装置を開発し、より精度よく選別することを想定している。

2.1 双腕マニピュレータ

開発対象のマニピュレータ本体には対象物の素材料ごとの分離、選別といった高出力でかつ器用な動作ができる機能と性能が要求される。筆者らはこれらの要求を解決する一手法として双腕型のマニピュレータを装備したハンドリング専用機を提案した[6]。双腕型のマニピュレータを選択した理由として、両腕の共同作業で、①切断、曲げなどの細かな選別が可能、②交換手間を要さず、機能の異なるアタッチメントを同時に複数装備できる、③長尺物の移送が可能、など長所が多く存在することが挙げられる。

Fig. 2 にマニピュレータの構成、**Table 1** にマニピュレータの自由度（走行部除く）について示す。

ベース部は、11[t] クラスの油圧ショベルである。主腕（右腕）は、市販のアタッチメントを装着し、従来の小割り作業が可能な出力を有する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。副腕（左腕）は、人が行っていた選別作業が可能なように器用さを重視し、さらに主腕と先端部で近接の作業が可能となるようロールを含む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。

Fig. 3 にマニピュレータ本体の駆動制御システムを示す。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

Fig. 1 Image of construction waste management RT system

Fig. 2 Next-generation manipulator

Table 1 DOF structure

		Front DOF			Attachment DOF	Total DOF
		Roll	Pitch	Yaw		
Main	3	0	3	0	2	5
Sub	6	1	4	1	3	9

ため、ベース部の油圧駆動システムおよびエンジンをそのまま使用する。一方、副腕の油圧駆動システムは3[t] 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およ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。

マニピュレータは傾斜センサと角度センサによって車体および主副腕各関節の姿勢を計測し、位置計測を行っている。本体の旋回中心を基準とした位置計測の誤差としては主腕先端位置で約±10[cm]、副腕先端位置で約±15[cm]という結果を得てい

Fig. 3 Control system

Fig. 4 Interference area

る。さらに、Fig. 4に示すように副腕先端に対して干渉判定領域を設け、情報表示モニタの警告ランプを点灯させてオペレータに注意を促す。なお、離脱判定がなされると警告ランプは消灯する。

2.2 多機能ハンド

マニピュレータにおいて実際の分離・選別の作業をするのは先端のハンド（アタッチメント）の部分である。

したがってハンドはその対象物や大きさ、または作業内容などから最適な機能が求められる。

前述の実態調査から、主腕に求められる機能はコンクリート塊の小割りなど、すで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、選別作業特有の細かな作業に対応する必要性があり、新たな多機能ハンドを開発することにした。

開発したハンドをFig. 5に示す。このハンドは、 $\phi 25$ [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。さらに主腕との共同作業で引き抜き、折り曲げ、捻りなどの作業が可能である。

2.3 操作システム

開発したマニピュレータには左右のマニピュレータを同時操作することが要求され、通常の油圧ショベルと比較して操作者

Fig. 5 Multi function hand

Fig. 6 Operation interface

Fig. 7 Simulator of operation interface

の負担増が予測される。よって、直感的に操作しやすく疲労が少ない速度指令方式（レバー信号により油圧比例バルブの開閉角を制御）の操作系が望ましい [7]。そこで、以下2点を基本コンセプトとして操作インターフェースの検討を行った。

- ・操作者の左腕で左マニピュレータ、右腕で右マニピュレータを駆動操作
- ・レバー操作方向とマニピュレータ動作方向が概略一致

試作した操作インターフェースをFig. 6に、検討に用いたシミュレータをFig. 7に示す。試作インターフェースはレバー取付角度等の各種調整機構を備え、シミュレータはレバー入力に対応して関節動作を確認することができる。本開発では、副腕の関節で複合操作を行う頻度が低いものをシフト方式で操作する方針とした。Fig. 8にフロント構成について示す。図中の括弧付の数字がシフト方式で操作する関節である。レバー取付角度 θ を2とおり、シフトスイッチ配置を2とおり（フットスイッチ、レバー付属スイッチ）、#2関節の割当を2とおり（#1と併用、#7と併用）の合計8とおりの試験を行い操作性について検討を行った。結果Fig. 9に示すようにシフトスイッチ操作がある場合には、#7ではなく#2が、#3ではなく#4が駆動する配置を割り当て、マニピュレータに実装した。これで実際のマニピュレータを操作したところ、シミュレータによる検証と同様に片腕で6自由度以上の操作が行えることが確認できた。シミュレータには油圧機器の応答特性等若干の相違はあるものの、操作の直感性に関しては事前検証のイメージとおりのとなった。操作レバーの最適な高さについては、操作者個人の身体に依存する部分が大きいため、実機開発においても試作時と同様

Fig. 8 Arm composition

Fig. 9 Arm control lever

の調整機能を残した。

3. ハンドリング動作計画システム

ハンドリング動作計画システムとは、マニピュレータで対象物を把持、移送するときの操作者支援、および激甚災害復旧対応など危険を伴う作業を行う場合の遠隔運転や、準自律運転を想定した次世代型建設機械の知能化システムと定義した。各センシング要素とハンドリング動作計画システムの構成を Fig. 10 に示す。まず、材質判定システムは、材質ごとのアタッチメント把持力を制御するために使用する。次に、把持対象物の質量情報は把持対象物の移送速度の決定に使用される。最後に、把持対象物の形状などを推定する対象物認識システムは、遠隔運転などで情報が不足するなかでもオペレータが効率よく作業を進める上で必要と考えた。

3.1 把持対象物の材質判定による把持力制御

ハンドリング動作計画システムの一つ目の要素として把持力制御がある。これは、通常オペレータが把持対象物を目視し慎重に操作しながら把持力調整を行っているのに対し、システムで対象物の材質判定を行い、自動的に把持力を制御するものである。高次の材質判定として、各種センサを複合的に活用し精密に材質を判定する手法を別途開発中である [8] が、本システムでは判定のリアルタイム性を重視し、画像処理による材質判定を選択した。選択するに当たり、ハンド表面の滑り感覚をセンシングする方法やバイラテラル制御による操作感覚フィードバックのアプローチもあるが、対象物である廃棄物の形状や把持時の変形の不規則性などからこれらを候補から除外した。

画像処理による建設副産物の材質判定を行う前提条件として、

Fig. 10 Handling planning system

Fig. 11 Material distinction method

(1) 把持対象物となる建設副産物の大きさや形状が一定ではない、(2) 解体現場での作業となることから粉塵などの影響で異なる材質の色が酷似したり、降雨や錆などで材質の色が変化する、などを考慮する必要がある。(1) の条件から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対象物を特定する [9] ことは膨大なデータベースが必要となる上、複雑で判定処理に時間を要する。(2) の条件からカメラ画像から得られた色情報で対象物を判定する [10] と精度よく判定することが難しい、などの課題が抽出された。

そこで、従来の画像の色彩や形状による判定に加え、本開発では新たに対象物表面のザラザラやツルツルなどの質感を使った判定を行い、よりロバスト性の高い判定システムを構築を試みた。

まず、色彩から材質判定を行う手順は、カメラで撮影した画像から把持対象物の RGB 情報を取得し、 $a^*b^*L^*$ 値に変換する。変換した $a^*b^*L^*$ 値から把持対象物の色彩を色座標で表す。色座標にはあらかじめサンプルを測定して採取した各材質の原点を用意しており、把持対象物の色座標点と各材質の原点との距離（色差）を演算し原点との距離が最も近い材質を判定結果として出力する (Fig. 11)。さらにシステムのロバスト性を高めるためにコンクリートや木材など水に濡れると色彩が変化するものや、鉄筋などのように錆により色彩が変化するものに対し

Fig. 12 Material distinction method weighted with surface texture

ては原点を複数用意することで対応した。しかし、異なる材質であっても設定した原点が非常に近いケースや、埃や汚れなどの影響により本来の色彩が損なわれるケースが判定精度を低下させる一つの要因になっていることが実験により分かった。

次に、異なる材質の色彩原点が近似することによる材質判定精度の低下を抑制するため、対象物表面の明度を示す L^* のばらつきを用いて対象物サンプルの表面質感をあらかじめ数値化し、測定した対象物の明度のばらつきと比較することで材質を判定する手法をシステムに組み込んだ。

対象物表面の質感を数値化し、重み付けを行う手順を以下に示す。

- I：対象となる廃棄物の $a^*b^*L^*$ 値から L^* 値を取得し、対象範囲内の各画素におけるラプラシアンを求め隣接する画素との明度差を顕著化する
- II：I で求めたラプラシアンの対象範囲内における平均値を求める (**Fig. 12**)。
- III：II で求めた平均値とあらかじめ測定しておいた各材質のラプラシアン平均値を比較し、各材質の範囲内に該当した場合は対象材質に対して重み付けを行う。

求められた各材質の重み付けは色彩による材質判定に反映され、色彩と表面の質感を用いた材質として出力される。

今回、色彩と表面の質感を用いた材質推定手法としてベイズ推定法を採用した。その理由として、(1) 画像処理による判別手法に新たな判定手法を追加しやすい、(2) 取得データの信頼性が低くても当座の結論を出せる、がある。なお、次のステップで形状による材質判定を要素として追加することを計画している。

実際の解体現場で得たサンプル画像について、色彩の値による判定に表面の質感による判定を加え、実際の建設副産物の材質判定を行った結果と、色彩の値のみで材質判定した結果を **Fig. 13** に示す。木材について判定正解率が低下したもののそのほかすべての材料において正解率が向上しており表面の質感による材質判定の有効性が確認できた。

Fig. 14 に把持力制御機能の概要を示す。解体現場の場合、コンクリート塊、鉄くず、アルミくず、木材、廃プラスチックが建設副産物として発生することは先に述べたとおりである。こ

Fig. 13 Result of material distinction

Fig. 14 Grasping force control system

のなかで塩化ビニール管などの廃プラスチックは低強度の材質のため、アタッチメントの把持用油圧シリンダの圧力を対象物が落下、破壊させない 5 [MPa] 以下（把持力：小）に設定した。さらに、木材などの中強度の材質では、14 [MPa] 程度以下（把持力：中）に設定し、木材、コンクリート塊ををつぶさずに掴んで持ち上げることが実験で確認できた。現状は本機能は操作支援システムの把持力設定スイッチ（大中小）をオペレータが選択し、主腕側アタッチメントの圧力を制御する方法で実験を実施してきたが、次のステップでは前述の画像による材質判定結果からハンドリング計画システムが最適な把持力を決定し、遠隔操作時でも作業ができるようにする予定である。

3.2 把持対象物の質量計測による移送速度制御

画像処理による材質判定機能を補完する、または対象物把持後の移送スピードを自動的に生成し安全に落下させることなく移動させるには把持対象の質量の把握が不可欠であることが判明した。そこで把持対象物の質量計測機能の開発を実施した。

把持対象物を掴む腕は重量物が主な対象となることから主腕に装備することを検討した。方式としては、

- ① ブームシリンダ保持圧力から演算する方法
- ② アーム先端ピン部で荷重を測定する方法（ピンに歪ゲージを装備して実施する方法）

が考えられるが、測定精度を向上させるには②の方法が有効である。当面は①の方法で検証しながらさらに精度向上を目指し

Fig. 15 Weight measuring system

②項も検討する方針とした。

測定精度は当初把持対象物の 10%以内の精度を目標にしたが、主として重量物の概略判定と、移送速度生成で利用するにはおおむね 20%程度でも十分であることが実験により判明し、目標値を見直した。

Fig. 15 に把持物質量計測機能の概要を示す。本機能は圧力センサの計測値から求めた主腕ブームシリンダの推力と、位置姿勢計測機能に基づいて演算される主腕の各構成部材のモーメントとの差から把持物質量を演算するものである。質量計測を行う姿勢を決め、あらかじめ空荷でオフセット更新（図中①）を行うことで、対象物重量の 20%以内の誤差で計測が可能となった（図中②）。

計測した把持物の質量に応じて動作速度の指令をハンドリング計画システムが行う。解体現場での安全性、効率化を考慮し質量が 0~60 [kg] で「通常」、60~100 [kg] で「低速」、100 [kg]~で「微速」の三段階で速度制御可能とした。

3.3 軌道制御のための把持対象物幾何学推定

対象物認識システムは、形状が異なる把持対象物の形状を計測し、対象物の幾何学位置、体積、重心位置などを推定することにより、マニピュレータの適切なハンドリング軌道を自動で生成、制御するなどの用途に用いることを目的としたものである。例えば、対象物の近傍にマニピュレータを即時に移動させる、既知の集積場所まで最適な軌道、速度で移送するなどである。

このような使途を考えた場合、システム開発の条件として、(1) ほとんどの対象物は不定形状である、(2) 対象物の位置はマニピュレータ中心を原点にできる、(3) 対象物の許容位置精度は数 cm 程度、(4) 走査範囲は奥行き 15 [m] 程度、幅 5 [m] 程度、(5) 情報の取得方法はマニピュレータ上からが望ましい、が挙げられる。これら条件を考慮して、オペレータが扱いやすく簡単な機器構成で実現できる情報取得手段の構築を試みた。**Fig. 16** に機器構成と情報の流れを示す。

まず、対象物の位置、形状データを取得するデバイスにはステレオカメラを採用した。ステレオカメラ（コニカミノルタオプト社製）の仕様を **Table 2**、概観を **Fig. 17** に示す。本システムは、マニピュレータ上に搭載されるため、基本的には作業空間の三次元情報を一方向からのみで捉えることになる。つまり、これまで開発されたステレオビジョン（三次元レーザスキャ

Fig. 16 Object recognition system

Table 2 Specifications of stereo camera

Image Sensor	1/3.3inch 1.3M pixels Color CMOS Sensor
Lens Focal Point	f=4.4mm
Angle	Vertical:40° × Horizontal:52°
Frame Rate	15fps
Still Image Output	SXGA (1280×960)
Output Interface	USB2.0, NTSC
Size / Weight	W145 × D44 × H62 / 250g

Fig. 17 Stereo camera

ナを含む)の多くが多点からの計測データをオフラインで三次元形状に結合し、精度を高め体積推定などを行う方法[11]に対し、対象物裏面やオクルージョンで欠落する三次元データが多く、三次元形状を精度よく生成することは難しい。しかしながら本開発の目的である把持対象物までのマニピュレータの軌道制御に用いるなど、把持対象物の体積や位置の精度が真値に対し、±数%程度まで許容できる場合、ステレオカメラの一方向から取得した三次元情報からある程度の形状推定が可能になれ

ばハンドリング動作計画に有効であると判断した。

形状推定的方式として、斜影による形状推定方式 (**Fig. 18**) と包み込みによる形状推定方式 (**Fig. 19**) を実装した。

前者については、対象物が一つ平面上に置かれているような場合に有効な手法である。特定の評価平面に対し、対象物の表面情報を射影することによって、表面ポリゴンと射影ポリゴン間で柱上要素を構成し、形状を推定する方法とした。**Fig. 20** に推定結果を示す。後者については、対象物が乱雑に積み上げられているような場合に有効と考えられる手法である。視線と直交する評価平面に対し、対象物の表面情報を対称に構成し、元の平面情報と対称面情報とで囲まれた範囲を推定形状とする方法である。

次に、オペレータへの各種情報提示に関しては、タッチパネル上に基準カメラの撮影映像を提示する方式を基本とした。これは、従来のステレオカメラの距離画像と呼ばれる映像 [12] が

Fig. 18 Object shape presumption by projection method

Fig. 19 Object shape presumption by covering method

Fig. 20 Result of object shape presumption

オペレータから分かりづらいとのヒアリング結果に基づいている。さらにオペレータは実映像を観察しながら作業空間の状況を把握するとともに、各種のコマンド操作で作業に必要な点や線、面、推定した形状の体積や重心位置といった情報を簡単な操作で求めることができる。

4. フィールド実証実験

マニピュレータおよびハンドリング動作計画システムの各要素技術ごとの機能確認のため、実際の解体現場を模したテストフィールドで実証実験を実施した。

Fig. 21 にテストフィールドの配置を示す。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、廃棄物を素材ごとと分離、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すことで、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 **Fig. 22** 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

Fig. 21 Test field

Fig. 22 Operation of the manipulator

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ないとの回答を得た。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なされた。

また、実験ではハンドリング動作計画システムに使用する各センシング要素のフィールドでの耐環境性能について検証した。対象物認識システム、材質判定システムに関しては、いずれも屋外特有の条件（日照、晴雨などの気象変化）において、特段の不具合はないものの、さらに安定的なセンシング結果を得るにはそれぞれのシステムの統合による情報の共有化やデータベースの強化が必要と考える。質量計測機能については、特定の関節角度範囲内でのキャリブレーションが現状必要であるが、作業効率への悪影響が懸念されることから新たなキャリブレーション方法の開発が必要である。さらにアタッチメント交換に伴うリセット機能も必要であることが分かった。

5. お わ り に

本稿では、解体現場における建設系産業廃棄物処理 RT システムを構築するに際し、必要となる次世代型建設作業用マニピュレータと把持対象物を適切に把持、移送するハンドリング動作計画システムの開発状況について述べた。

マニピュレータについては、今回双腕方式を採用したが、これは解体作業だけではなく建設作業全般にわたって応用可能な技術であると期待している。

また、フィールド実証実験では、実際に解体現場で解体機の操作に従事するオペレータにマニピュレータ操作を行ってもらい率直な意見を聞くことができた。これは、今後の開発の優先順

位を見極めるうえで参考になるもので、さらに研究開発スピードを速め彼らの期待に応えて行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、ご指導いただいた千葉工業大学平井成興氏をはじめ多数の関係者の皆様に敬意を表す。

参 考 文 献

- [1] 環境省：循環型社会形成推進基本法について、<http://www.env.go.jp/recycle/circul/recycle.html>
- [2] 環境省：3R イニシアティブ、<http://www.env.go.jp/recycle/3r/>
- [3] 柳原好孝：“解体現場における廃棄物分離・選別システムの開発”，日本建築学会第 17 回建築施工ロボットシンポジウム，pp.39-44，2007.
- [4] 国土交通省大臣官房官庁営繕部：建築物解体工事共通仕様書・同解説（平成 18 年版），公共建築協会，2006.
- [5] 後久，遠藤，中村（聡），中村（宗隆），上野，柳原，生田，江川，小俣，藤島：“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 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM，1K24，2007.
- [6] 後久，柳原，石橋，富田，小俣，藤島：“解体スクラップ処理に適した双腕型作業機械の開発”，第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM，2D2-04，2008.
- [7] 石井啓範：“2 つのフロントを有する双腕作業機の開発－速度指令式ワレバー方式で制御－”，建設の施工企画，no.670，pp.31-35，2005.
- [8] 中村，後久，柳原，遠藤，上野：“建物解体現場における廃棄物選別システムの開発”，第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM，2D2-01，2008.
- [9] 田村秀行：コンピュータ画像処理入門，総研出版，1985.
- [10] 木下健治：画像処理システムの基礎と設計・製作，CQ 出版社，1986.
- [11] 大石，増田，倉爪，池内：“創建期奈良大仏及び大仏殿のデジタル復元”，TVRSJ，vol.10，no.3，2005.
- [12] Point Grey Research 社：<http://www.ptgrey.com/index.asp>

柳原好孝（Yoshitaka Yanagihara）

1988 年熊本大学工学部生産機械工学科卒業。同年東急建設（株）入社。現在，技術研究所メカトログループリーダー。建設メカトロニクス，建設機械の遠隔操縦，ヒューマノイドロボット，マン・マシンシステムの研究開発に従事。技術士（機械部門）。日本機械学会会員。（日本ロボット学会正会員）

後久卓哉（Takuya Gokuyuu）

1992 年桐蔭横浜大学工学部制御システム工学科卒業。同年東急建設株式会社入社。基礎工事用機械，壁面塗装ロボットなど土木建築用施工機械の自動化，工事環境計測システムの研究開発に従事。（日本ロボット学会正会員）

遠藤 健（Ken Endou）

1988 年武蔵工業大学機械工学科卒業。同年東急建設（株）入社。建設作業用マニピュレータの開発，自由断面掘進機の高度化研究，非開削推進工法のボーリングヘッド位置・姿勢検出装置等の開発を担当，現在タイル診断ロボットの研究開発に従事。（日本ロボット学会正会員）

中村 聡（Satoru Nakamura）

1998 年東京電機大学理工学部産業機械工学科卒業。同年東急建設（株）入社。現場内搬送装置，壁面診断ロボットなど土木建築用機械の開発，廃棄物選別装置の研究開発に従事。（日本ロボット学会正会員）

上野隆雄（Takao Ueno）

1990 年武蔵工業大学修士課程修了。同年東急建設（株）入社。コンクリート配給装置等の建設ロボット，遠心場における掘削実験装置等の開発に従事。日本機械学会会員。（日本ロボット学会正会員）

小俣貴之（Takayuki Omata）

1997 年東京理科大学工学部機械工学科卒業。同年日立建機（株）入社。油圧ショベルの応用製品開発を担当，現在新製品開発関連の研究に従事。

石橋英人 (Hideto Ishibashi)

1995 年茨城大学大学院工学研究科修了。同年日立建機（株）入社。建設機械の自動化・情報化技術の開発を担当，現在双腕作業機の開発に従事。

富田邦嗣 (Kunitsugu Tomita)

2002 年早稲田大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。同年日立建機（株）入社。現在，同社技術開発センタ研究員として，双腕作業機などロボティクスを応用した建設機械高度化の研究に従事。