

双腕型建設用マニピュレータの 遠隔操作支援技術の開発

柳原好孝

汎用機であるショベル系掘削機の遠隔操作は、これまで主として地震や火山活動に伴う災害における危険地帯での土工事に採用されるケースが多かった。しかしながら、今やショベル系掘削機は単に土工事に止まらず、その機能を拡大し、解体作業や重量物のハンドリングなど多機能性を持たせた機械へと進化しつつある。これにより、被災地での土工事以外の災害救助や瓦礫撤去作業、原子炉解体など極限環境下での遠隔操作の適用に期待が高まってきている。

今回、解体作業用に新たに開発した双腕型マニピュレータに遠隔操作機能を搭載するに当たり実装を予定している要素技術について概要を述べる。

キーワード：解体工事、災害復旧、RT、マニピュレータ、遠隔操作、オペレータ支援

1. はじめに

建設機械、特に汎用機であるショベル系掘削機の遠隔操作については、極限環境下や災害対応などその用途に応じ様々な研究がなされてきた。筆者らもこれまでに、災害復旧工事での使用を目的に図-1のような土工用機械の遠隔操作システム¹⁾や、遠隔臨場制御に関する研究(図-2)²⁾、さらには人間型ロボットに建設機械を代行運転(図-3)³⁾させるなど遠隔操作に関する研究開発を進めてきた。

今回、廃棄物などのマニピュレーションを行う双腕

型建機⁴⁾を遠隔操作するうえで、遠隔のオペレータにどのような情報を提示することが操作支援になるかを検討し、いくつかの要素技術を実装することとした。



図-2 遠隔臨場制御技術



図-1 土工機械の遠隔操作システム



図-3 人間型ロボットによる代行運転

2. 建設用マニピュレータの遠隔操作要素技術

建設機械の遠隔操作技術は、将来の自律運転に向けた要素技術の確立のための道程であるとともに、オペレータを支援しながら複雑な作業を遂行するためのヒューマンインターフェースが重要な要素となる。

まず、建設機械の自律運転を可能とするためには、建設機械の各可動部に位置センサや圧力センサを具備し、コントローラを介し、エンジンや油圧の出力制御を行うなど建設機械のRT化が必要である。これによりマニピュレータの軌道生成、さらに自己位置検出を行うことで、不整地での自動走行なども可能になると考えられる。

一方、オペレータの支援技術には、視覚提示、音声提示、建機の状態（負荷、振動、姿勢等）があるが、オペレータの操作に関与する支援技術は少なかったと言える。

今回、オペレータの操作に関わらずマニピュレータのハンドリング動作を支援する「ハンドリング動作計画システム」を提案した。次項にシステムの概要と一部試作した内容を示す。

3. ハンドリング動作計画システム

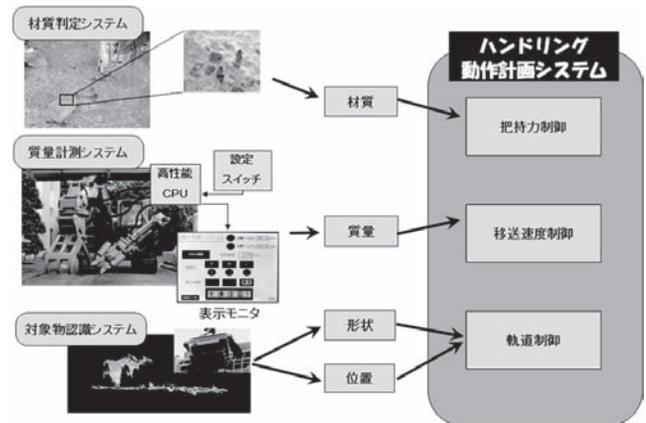
ハンドリング動作計画システムとは、双腕型建設用マニピュレータ（図—4）で建設副産物などの対象物を把持、移送する時の操作者支援、および多自由度の操作をコマンドレベルで動作させる知能化システムと定義した。各センシング要素とハンドリング動作計画システムの構成を図—5に示す。

(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



図—4 双腕型建設用マニピュレータ



図—5 ハンドリング動作計画システム

ているのに対し、システムで対象物の材質判定を行い、自動的に適切な把持力に制御するものである。まず、把持力を決定するには対象物の材質が何であるかを特定する必要があるが、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。

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、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色が酷似することや、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⁵⁾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⁶⁾と精度良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の構築を試みた。

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、 $L^*a^*b^*$ 値に変換する。変換した $L^*a^*b^*$ 値から把持対象物の色彩を色座標で表す。色座標には予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あり、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。

さら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（図—6）。

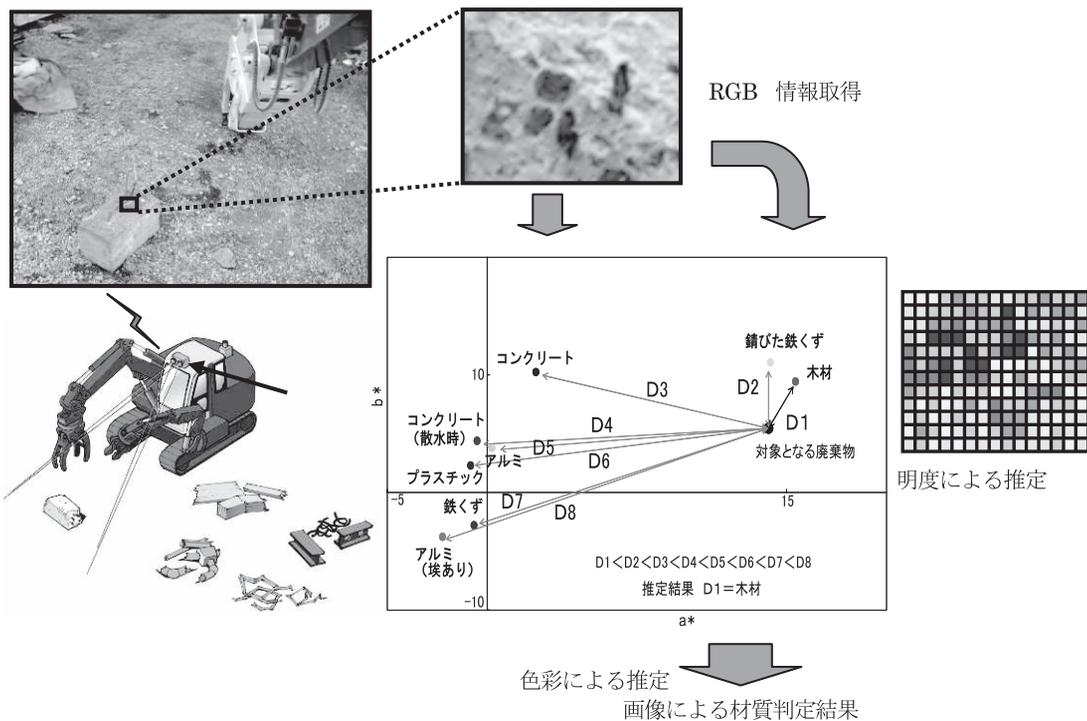


図-6 画像による材質判定手順

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形状を要素として追加することを計画している。

図-7に把持力制御機能の概念を示す。解体現場の場合、コンクリート塊、鉄くず、アルミくず、木材、廃プラスチックなどが建設副産物として発生する。この中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）に設定している。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、コンクリート塊をつぶさずにつかんで持ち上げることが実験で確認できた。現状本機能は、操

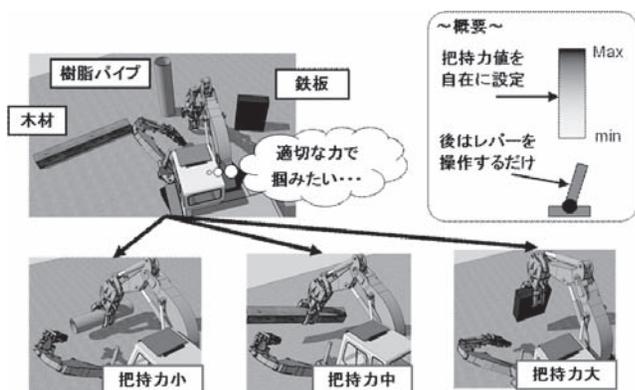


図-7 把持力制御機能

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出来るようにする予定である。

(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無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とした。

図-8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（右腕）ブー

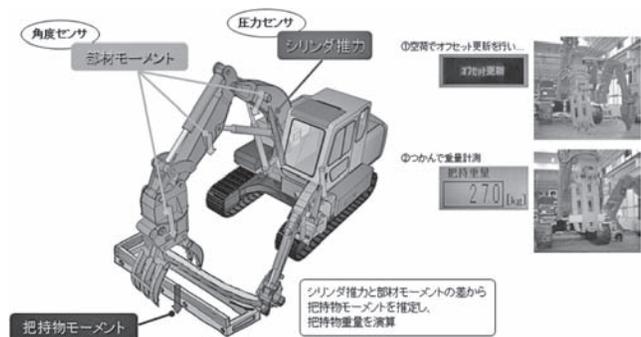


図-8 質量計測機能

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。実験により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であることを確認した(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動作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」の三段階での速度設定とした。

(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、対象物の幾何学形状、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。

このような用途を考えた場合、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。図-9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。ステレオカメラの概観を図-10に示す。

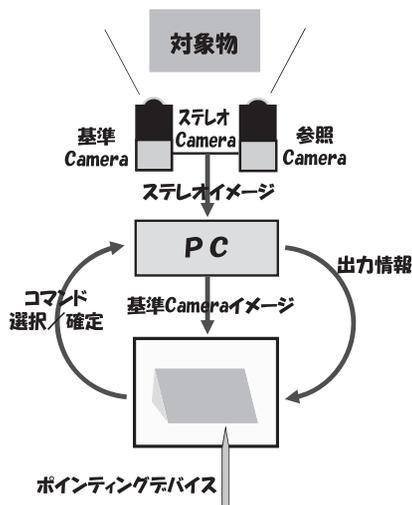


図-9 機器構成



図-10 ステレオカメラ

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、三次元形状を精度良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。

形状推定の方式として採用した基準面（たとえば地表面）に斜影する形状推定方式による推定結果を図-11に示す。

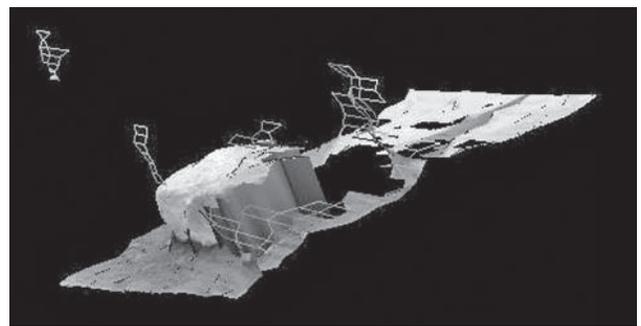


図-11 推定結果

次に、オペレータへの対象物の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⁷⁾がオペレータから判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. おわりに

今回，双腕型建設用マニピュレータを開発するにあたり遠隔操作機能を実装し，搭乗運転では危険と想定される被災建物の解体作業や災害現場での瓦礫撤去作業，極限環境下（放射線，ダイオキシン，アスベスト）での各種重作業に適応すべく，現在開発を進めている。

特に遠隔操作は搭乗運転に比べ，少ない情報をもとにオペレータは操作することになるが，その操作に直接関与し，効率的で安全な操作支援システムを構築することが重要ではないかと考えている。

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謝意を表します。

JICMA

《参考文献》

- 1) 鷹巣征行，佐藤務，遠藤健，柳原好孝：建設作業用マニピュレータの遠隔臨場制御について，第4回建設ロボットシンポジウム論文集，pp57-64,1994
- 2) 柳原好孝：建設ロボット遠隔臨場マニピュレータ，建築技術 No509, pp78-81, 1993
- 3) 柳原好孝，上野隆雄，後久卓哉，遠藤健，中嶋勝己，小林政巳，蓮沼仁志，御船文里，横井一仁：人間型ロボットによる建設機械の作業評価実験（HRP 代行運転分野），第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2003
- 4) 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
- 5) 田村秀行：コンピュータ画像処理入門，総研出版，1985
- 6) 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
- 7) Point Grey Research 社：http://www.ptgrey.com/index.asp

【筆者紹介】

柳原 好孝（やなぎはら よしたか）
東急建設株式会社
技術研究所
メカトログループ



平成 22 年度版 建設機械等損料表 発売中

■内 容

- ・国土交通省制定「建設機械等損料算定表」に基づいて編集
- ・損料積算例や損料表の構成等をわかりやすく解説
- ・機械経費・機械損料に関する通達類を掲載
- ・各機械の燃料（電力）消費量を掲載
- ・主な機械の概要と特徴を写真・図入りで解説
- ・主な機械には「日本建設機械要覧（当協会発行）」の関連ページを掲載

■B5 判 約 720 ページ

- 一般価格
7,700 円（本体 7,334 円）
- 会員価格（官公庁・学校関係含）
6,600 円（本体 6,286 円）
- 送料（単価） 600 円（但し沖縄県を除く日本国内）
注1）複数冊発注の場合は送料単価を減額します。
注2）沖縄県の方は（社）沖縄建設弘済会
（電話：098-879-2097）にお申し込み下さい。

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>