

# 未知形状の小型物体を自動で拾い上げる移動マニピュレータ

## A Mobile Manipulator System for Picking up an Unknown Object

学 山崎 公俊 (筑波大) 正 友納 正裕 (筑波大)

正 坪内 孝司 (筑波大) 正 油田 信一 (筑波大)

Kimitoshi YAMAZAKI, Masahiro TOMONO, Takashi TSUBOUCHI and Shin'ichi YUTA  
(University of Tsukuba)

yamazaki@roboken.esys.tsukuba.ac.jp

This paper describes a mobile manipulator which working in real world. Mobile robot studies so far that manipulate an object in real world almost use some constraints such as an arranged tag on an object or an object model which is given to the robot in advance. The authors aim to develop a mobile manipulator that can acquire an object model through video images and can manipulate the object. We implemented a mobile manipulator which can pick and hand an object to a person autonomously. Key Words : Mobile Manipulator, 3D Object Modeling, 3D Object Grasping

### 1 はじめに

本稿は、小型の物体を把持・運搬する移動マニピュレータシステムについて述べる。本システムの特徴は、物体の形状や掴み方などの知識を、人手で与えなくとも良いことである。物体モデルの生成と把持計画を、ロボットが自動で行い、物体を掴みあげることができる。

家庭やオフィスなどの実環境で動作する移動ロボットに、物体の把持・運搬作業を行わせることは、極めて有用である。従来、様々なアプローチで、このような作業を実現した研究がある。そこでは、物体操作に必要な知識を、ロボットないし物体に、事前に与えることが多かった。すなわち、センシング機能を持たせたロボットで、1) 事前に与えられた物体モデルとセンシングの結果を照合したり [3]、2) 物体に貼付された ID タグ [1] や QR コード [2] から物体情報を読み取る、などを行い、物体の把持・運搬を行っていた。これらのアプローチは、物体の掴み方も事前に人手で定義しておくことで、物体操作が可能になる。しかし、事前知識のない物体を、新たに操作の対象とすることが困難である。

筆者らは、従来とは異なるアプローチで、物体操作を行う移動マニピュレータを提案し、研究を行ってきた。具体的には、ロボットに搭載したカメラを用いて、物体の三次元形状モデルを自動生成する手法を提案した [4]。また、このモデルを入力とした把持計画手法を提案し、それが様々な形状の物体に適用できることを示した [5]。この枠組みでは、人手による操作がほとんどなく、操作物体を新たに加えることができる。これは、実環境を自由に移動するロボットにとって、多くの物体が操作対象となりうることから、大きな利点である。

本研究の目的は、これらの機能を統合したロボットで、小型物体の運搬作業を実現することである。この一例として、机の上に置かれた物体を把持・運搬し、人間に手渡す作業を行わせる。作業実現への課題のひとつは、台車の位置決めである。本研究の物体モデル生成では、台車を物体の前まで移動して、物体を周囲から観測する必要がある。このとき、車輪のスリップなどの要因で台車位置に誤差が入った場合、物体の観測が困難になる。また、別の課題として、物体モデルのスケールリングがある。本

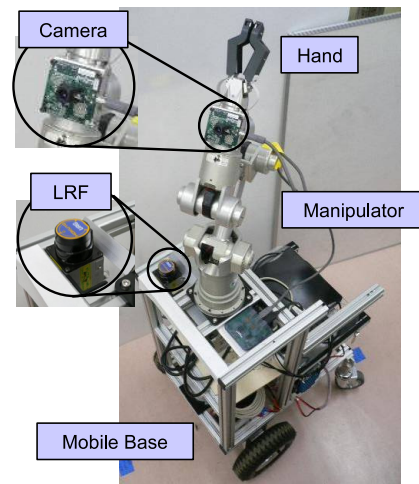


図 1: Mobile Manipulator

研究では、画像を基にした物体モデル生成を行っている。ここでは、モデルのスケールは任意である。そのため、物体の大きさを、実際のスケールに合わせる必要がある。これらの課題を、台車に搭載した測域センサを利用することで解決する。測定した物体の位置情報から、物体モデルのスケール決めと、台車位置の修正量算出を行う。

### 2 問題設定とアプローチ

#### 2.1 移動マニピュレータ

図 1 は、本研究で用いるロボットである。筑波大学知能ロボット研究室で開発された二輪駆動型の移動台車「山彦」に、Neuronics 社製の小型マニピュレータ「Katana II」を搭載する。マニピュレータは、物体を把持するための二指ハンドを有する。また、形状モデル生成で画像を利用するため、手首に一台のカメラを取り付ける。カメラは、PointGray 社製の IEEE1394 カメラ「FireFly」を用いる。一方、台車には、ロボットと物体の位置関係を把握するための距離センサとして、北陽電機製の「URG

X002S」を搭載する。

## 2.2 想定タスク

ロボットに行わせる動作として、机上に設置した一つの小型物体を把持・運搬し、別の場所にいる人に、手渡す動作を考える。機の配置や形状などは、事前に与える。ロボットは、以下の流れで運搬作業を行う。

1. 手渡して欲しい物体の位置を、人間がロボットに提示する。
2. ロボットは、物体が置いてある机の前まで移動する。
3. カメラで画像を取得しながら、物体の三次元モデルを生成する。また、把持計画を立て、マニピュレータで物体を掴みあげる。
4. 人間の居る場所まで移動し、物体を手渡す。

本研究では、物体が片手に収まる大きさであれば、その形状については、特に制限を設けない。ただし、モデル生成には画像を利用することから、物体にはテクスチャ(模様)があるとすると、物体は、カメラによる観測が容易な位置に置かれているものとし、複数の物体が近接したり重なり合っている状況は想定しない。

## 2.3 課題とアプローチ

想定タスクを実現するためには、

1. 台車の移動誤差により、物体の前まで移動したロボットの到達位置が、目標位置と異なる場合がある。
2. モデル生成処理で得た物体モデルの大きさが、実際の物体の大きさと異なる。

といった問題がある。1. は、移動ロボットであるが故に生じる問題である。一般に、移動台車の位置推定にはオドメトリが用いられる。しかし、オドメトリには、車輪のスリップなどの要因で誤差が入りうるため、目標の位置に台車が到達できるとは限らない。

2. は、物体モデルの生成処理が、実環境の座標系を基準としていないため、生じる問題である。一般に、画像を基にした物体モデリングでは、カメラ座標系を基準とする方が、処理が安定して行える。一方で、カメラ座標系と世界座標系との整合を正確にとらなければ、物体の位置やスケールが、実際の値と異なってしまふ。

これらの問題を、台車に搭載した測域センサを利用することで解決する。具体的には、台車を物体の前まで移動したところで、物体の位置を測定する。このとき、想定した位置に物体が観測されなければ、台車の位置がずれていると判断し、修正を行う。また、ロボットと物体の位置関係も分かるため、物体までの距離を利用することで、スケールが修正可能になる。

## 3 物体モデル生成と把持計画

本章では、物体モデル生成と、把持計画について、手法の概要を説明する。

### 3.1 物体モデルの生成

本研究での物体モデルは、物体形状を電子的に復元した、三次元の点列データである。これを、物体を撮影した画像列から求める。画像列は、マニピュレータに搭載したカメラを、物体の周囲で動かしながら得る。

復元の手順は、以下のとおりである。

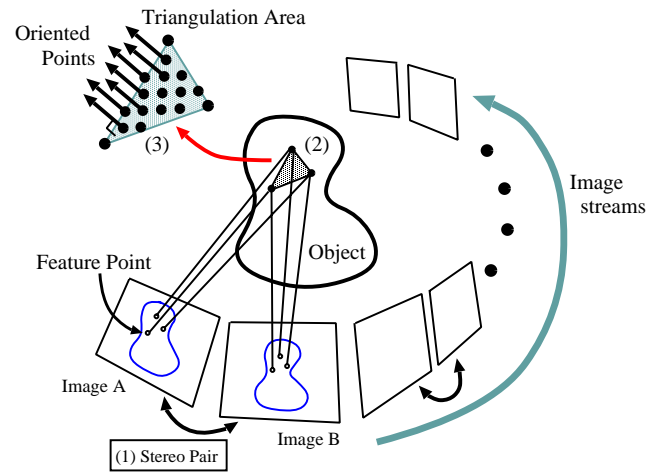


図 2: Object Modeling

疎な形状の復元 [4] 画像中でテクスチャの強い小領域から「特徴点」を抽出し、画像間の特徴点の推移を記録する。ここから、物体の疎な形状とカメラの姿勢変化を SFM (Structure from Motion) で得る。この結果は、最初のカメラ姿勢を基準とした座標系で得られる。また、復元のスケールも任意である。そのため、他の情報を利用して、モデルを世界座標系に変換し、実スケールに合わせる処理が必要になる。この詳細は、4 章に述べる。

密な形状の復元 [4] 画像列から、撮影位置に近い二枚の画像をひとペアとし、ステレオ復元を行う。ペア内に共通して存在する特徴点を調べ (図 2.(1))、これらの特徴点のうち、各画像内で近傍に位置する三点を選び、三角パッチを構成する (図 2.(2))。この三角パッチの領域を点の集まりとし、それぞれの点の三次元位置を求める。このとき、三角パッチの法線成分をそれぞれの三次元点に付加する (図 2.(3))。以上の処理を多数の画像ペアで繰り返し、すべての復元点を三次元空間に統合する。

voxel 空間への統合 [5] 密な復元形状を包み込む大きさで、voxel 空間を定義し、三次元点群を voxel 空間に投票する。ひとつの voxel に複数の点が投票された場合は、投票された点の方向成分の平均値を求め、ひとつの voxel がひとつの方向成分を持つようにする。voxel のサイズは、把持動作においてハンドが許容できる誤差から、一辺 5 ~ 10mm 程度とする。形状モデルは、物体表面の法線成分を持った数百程度の voxel 集団として得られる。

最終的な物体モデルは、密な復元で得られた結果から、データ量を削減し、誤差を平均化したものである。これにより、把持計画を効率的に行うことができる。

### 3.2 把持計画 [5]

前述の流れで生成した三次元モデルを基に、把持計画を行う。移動マニピュレータが取りうる姿勢で、物体の把持位置を見つける。

計画では、仮想ハンドで物体モデルを把持するシミュレーションを、仮想ハンドの姿勢を様々に変えて行う。それぞれの姿勢を、以下の基準で評価する。

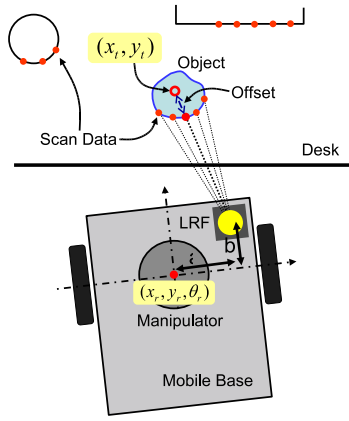


図 3: Measurement

1. ハンドと物体モデルの接触面積が大きい。
2. 物体の把持位置が、重力によって物体に生じるモーメントに対して、バランスの取れた位置にある。

この結果、50~100 程度の把持候補が得られる。その中から、マニピュレータが実際に把持姿勢を取れるものを残す。これは、逆キネマティクスが解くことで判る。最終的に残った把持姿勢のうち、一番良い評価が得られた姿勢で把持動作を行う。

#### 4 統合に向けた改良

本章では、ロボットシステムの統合における改良点について述べる。特に、測域センサの利用法を示す。

##### 4.1 センサの使い分け

ロボットは、大きく分けて、台車部分とマニピュレータ部分から成る。台車には、光走査型の測域センサ「URG」(以下、URG)を搭載する。URGは、重量170gの小型センサである。これは、マニピュレータの手先に搭載するにはやや重い、台車への搭載には適している。一方で、カメラは十分軽量であり、得られる情報量も豊富である。そこで、カメラとURGを、以下のように使い分ける。

1. 台車と物体の相対的な位置関係を求めるために、測域センサを利用する。
2. 物体の全体形状を得るために、カメラを利用する。

URGは台車に搭載するため、マニピュレータに搭載したカメラと比べ、動きの自由度が低い。そのため、このセンサで物体を全周囲から観察することは困難である。そこで、物体モデルは、マニピュレータ上のカメラを利用して生成する。ただし、こうして得た物体モデルは、復元のスケールが任意であるため、URGの距離データを利用して、実スケールに合わせる。

##### 4.2 距離データに基づく修正

URGで物体を測定するのは、ロボットが初期位置から物体の前まで移動した後である。移動後のロボット前方の距離データから、物体とロボットの相対位置を求める。

###### 4.2.1 台車位置の修正

世界座標系から見た物体中心の位置を、 $\mathbf{x}_T = (x_T, y_T)$  とし、ロボットの位置・姿勢を、 $\mathbf{x}_r = (x_r, y_r, \theta_r)$  とす

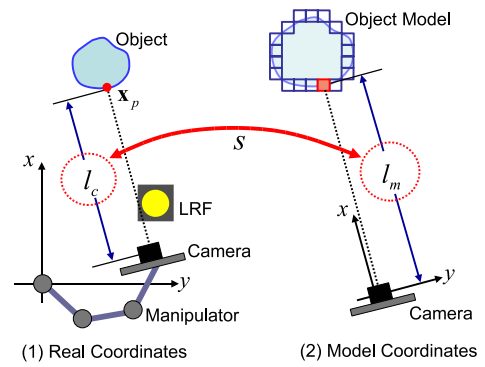


図 4: Scale Adjustment

る。これより、ロボットの座標系から見た物体の推定位置  $\hat{\mathbf{x}}_t = (\hat{x}_t, \hat{y}_t)$  は、以下の式で求まる。

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{R}_r^t \mathbf{x}_T - \mathbf{R}_r^t \mathbf{T}_r \quad (1)$$

$\mathbf{R}_r$  は、ロボットの姿勢に関する回転行列、 $\mathbf{T}_r$  は平行移動ベクトルである。 $t$  は転値を表す。

物体の実測位置  $\mathbf{x}_t$  は、以下のように求める(図3)。

1. 机の前に台車を移動した後、机上を測距する。
2. 距離データのうち、想定する物体位置の付近に観測されたデータ列を抽出する。
3. 抽出したデータ列の中心となる点  $(x_p, y_p)$  をひとつ選び、所定のオフセット値を加える。この座標値を、 $(x_u, y_u)$  とする。
4. 台車から見た物体の相対位置を、 $(x_t, y_t) = (x_u + a, x_u + b)$  として求める。

台車位置の修正は、 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 、 $\mathbf{x}_t$  の差が所定の閾値より大きい場合に行う。

$\mathbf{x}_t$  は、物体の中心ではないため、 $\hat{\mathbf{x}}_t$  との差分は0にならない。ただし、ここで求める物体の位置精度は、モデル生成時にカメラを所定の軌跡で動かしたとき、物体が撮影範囲に収まる程度でよい。一方で、物体は片手に収まる大きさを想定している。これらより、あらかじめ設定したオフセット値を元データに加え、物体の中心とする。実装では、 $\hat{\mathbf{x}}_t$  と  $\mathbf{x}_t$  の差が2~3cm以内に収まれば、修正の必要はないと判断する。

###### 4.2.2 物体モデルのスケール修正

物体モデルのスケールは、カメラと物体の距離から求める。ロボットの座標系で、物体表面の点を  $\mathbf{x}_p = (x_p, y_p, z_p)$  とする。 $z_p$  はURGスキャン面の高さである。また、ロボットの座標系から見たカメラの位置を  $\mathbf{x}_c = (x_c, y_c, z_c)$  とすると、この二点から、カメラと物体の間の距離  $l_c$  が求まる。一方で、物体モデルの座標系で、 $\mathbf{x}_p$  と近い位置関係にある点を探し、カメラまでの距離  $l_m$  を求める。ここから、スケールパラメータ  $s = l_c / l_m$  を算出する。概念図を図5に示す。この  $s$  を物体モデルの三次元点に掛けることで、スケールを合わせる。

この手法では、物体の位置のみを測定しており、机と台車の位置関係は考慮していない。また、物体の姿勢については、マニピュレータの関節角から求めたカメラ姿勢を、ワールド座標系に変換して求めている。しかし、この

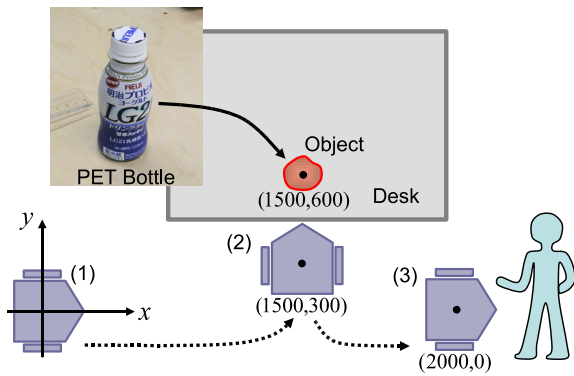


図 5: Experiment



図 6: Experimental Result

カメラ姿勢の精度はそれほど高くないため、物体の姿勢も、距離データを利用して修正することが望ましい。これは、今後の課題である。

## 5 実験

移動マニピュレータシステムを構築し、実験を行った。実験環境と対象物を図 5 に示す。本実験では、ロボットの経路は、基本的にポテンシャル法を用いて生成した。ただし、ロボットが机に近づく部分については、あらかじめ決めた動作を手で与えた。また、物体を把持した後、机との接触を避けるための転回動作も、手で定義した。そのほかの動作は、全て自動で計画したものを利用した。

図 6 に実験の様子を示す。ロボットは、(1) 机の前まで移動し、(2) 画像を取得しながら形状モデルを生成し、(3) 把持計画の結果から把持を行い、(4) 人間の前まで移動し、手渡す動作を実行した。すべての処理は、ロボットに搭

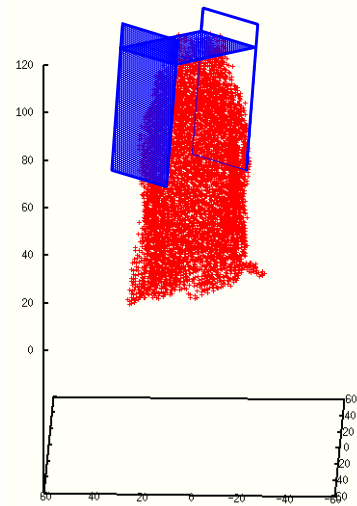


図 7: Object Model and Grasp Pose

載した二台のノート PC (Pentium M, 2.0GHz, Celeron, 1.0GHz) で行った。主な処理に要した時間は、カメラを動かしながら物体の疎な形状を得るのに約 220sec、その結果から物体モデルを得るまでに 2.4sec、把持計画には 0.65sec であった。

図 7 は、画像列から生成した形状モデルと、それをもとに決定した把持姿勢である。この結果に従い、把持・運搬動作を実行することができた。

## 6 まとめ

本稿では、物体モデルの生成と、把持計画を自動で行う移動マニピュレータシステムについて述べた。台車に測域センサを設置し、台車の位置誤差を検出する手法を提案した。また、物体モデルのスケールを決める手法を提案した。ロボットシステムを統合し、物体の受け渡し作業を実現した。

今後の課題として、4.2.2 で述べたように、測域センサの利用法を拡張することがある。また、より複雑な環境でも受け渡し動作が可能となるよう、改良を行う。

## 参考文献

- [1] N. Y. Chong and K. Tanie: "Object Directive Manipulation Through RFID", Proc. Int. Conf. on Control, Automation, and Systems, Gyeongju, Korea, Oct. 22-25, 2003.
- [2] R. Katsuki, J. Ohta, T. Mizuta, T. Kito, T. Arai, T. Ueyama and T. Nishiyama: "Design of Artificial Marks to Determine 3D Pose By Monocular Vision", Proc. 2003 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.995-1000, 2003.
- [3] J. Miura, Y. Shirai and N. Shimada: "Development of a Personal Service Robot with User-Friendly Interfaces", 4th Int. Conf. on Field and Service Robotics, pp.293-298, 2003.
- [4] 山崎, 友納, 坪内, 油田: 「移動ロボット搭載のカメラを用いた物体の 3 次元形状モデリング」, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.7, pp.102-111, 2005.
- [5] 山崎, 友納, 坪内, 油田: 「移動マニピュレータに搭載するための三次元小型物体の把持計画」, 第 11 回ロボティクス・シンポジウム予稿集, pp.339-344, 2006.