

密な三次元形状モデルに基づく小型物体の把持

山崎 公俊 (筑波大) 友納 正裕 (筑波大) 坪内 孝司 (筑波大) 油田 信一 (筑波大)

Automatic Object Grasping Based on 3D Surface Model

*Kimitoshi Yamazaki, Masahiro Tomono, Takashi Tsubouchi and Shin'ichi Yuta
(University of Tsukuba)

Abstract— This paper describes an object grasping strategy based on object's 3D surface model. We assume that an object model is acquired from multiple sensors mounted on a robot which automatically plans and grasps objects based on their 3D model. Grasping pose is planned as follows: 1)Using an object model which is represented by oriented points, multiple grasp candidates are selected by searching large contact areas between the manipulator to points based on normal vector of the object's surface, 2)An unique grasping pose is determined from these candidates by calculating the motion cost of the manipulator. Experimental results show our developed autonomous grasp planning and grasping behaviour based on 3D surface model.

Key Words: Grasping, Mobile Manipulator, 3D Surface Model, Oriented Points

1. はじめに

本稿では、物体の密な三次元形状モデルを基にした、把持計画手法を提案する。物体のモデルは、ロボットがセンサデータから自動生成すると想定する。このモデルに対して、二本の平面指で構成されたハンドによる物体の把持計画を立て、把持動作を実現する。

従来、実環境で動作するロボットが、物体を操作する研究が存在する。物体に人工マーカなどを貼付したり¹⁾³⁾、あらかじめ与えた物体のモデルを基に、Bin Pickingを行う研究²⁾がある。これらの研究では、ロボットに新たな種類の物体について作業を行わせる際、物体の形状や把持箇所、それに対する動作を人手で与える必要がある。しかし、環境中を自由に移動できるロボットにとっては、実環境に存在する多くの物体が操作の対象となり得るため、ロボットもしくは物体に事前知識を持たせるこれらのアプローチには、限界がある。

本研究の目的は、物体の密な三次元形状モデルを入力として、物体の把持動作を自律的に行う移動マニピュレータを構築することである。密な三次元モデルは、ロボットに搭載したカメラやLRFなどの外界センサから、自動で獲得する。これを利用して把持計画を行い、物体を把持する。このロボットシステムでは、物体のモデルをその場で生成するため、その物体の把持方法も、ロボットが自動で生成しなければならない。あらかじめモデルが与えられる場合に比べ、困難な条件下で把持計画を行う必要がある。

筆者らは以前、物体の三次元モデリング手法を提案した。そこでは、物体形状の事前知識やマーカを与えることなしに、物体の三次元形状モデルを移動ロボットで自動生成した⁶⁾。本稿では、自動生成したモデルの利用を想定した物体の把持計画手法と、それに基づいた把持の基礎実験について述べる。

2. 問題設定とアプローチ

2.1 問題設定

把持の対象とする小型物体には、以下の仮定を置く。

- 物体は人間の片手に納まる程度の大きさで、軽量な剛体である

- 十分な接触面積を確保して把持できれば、物体とハンド間に滑りは起きない
- 物体の形状モデルは、方向付き点群⁵⁾で与えられる移動ロボットに搭載するハンドは、小型、軽量の機構のものが適しているため。本研究では、二つの平行な平面指で構成される二指ハンドを想定する。

2.2 課題とアプローチ

本研究での把持計画は、入力された物体の三次元形状モデルに対し、マニピュレータが動作可能な範囲で、物体の把持姿勢を見つけることである。具体的には、三次元点群の並びである形状モデルから、物体とハンドが接する面積をなるべく大きくするようなハンドの姿勢を選出し、そこからマニピュレータで掴みやすい姿勢を選択する。ここでの把持計画における課題は、把持姿勢の探索空間をいかに効率よく削減できるかである。

提案手法では、探索空間の削減を二段階で行う。

- 点群の位置と、物体表面の法線成分から、物体を構成する形状要素(平面、円筒形状、その他)を判定する。この結果を次項の処理に反映し、想定する二指ハンドでは把持不可能な部分を、探索処理から除く。
- 物体のある領域に、片方の指が接するとしたとき、もう一方の指との挟み込みで、安定した把持が可能かどうかを調べる。また、二指の位置関係がハンドの最大開き幅以内に収まるかどうかを調べる。これらの条件をクリアした場合のみ、探索処理へ移行する。

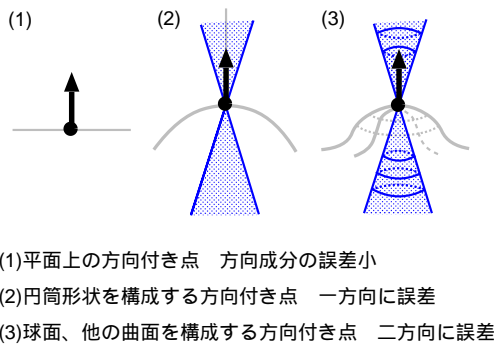
探索空間の削減の詳細については、次章で述べる。

3. 把持計画

3.1 方向付き点群

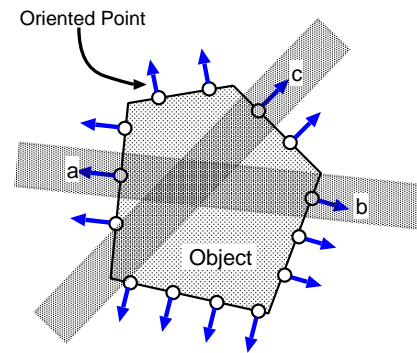
把持計画の効率化のために、物体モデルを「方向付き点群」として表現する。方向付き点とは、物体の復元形状を構成する三次元点に、物体表面に対する法線成分を持たせたものである。

方向付き点には、周囲の三次元点との関係や、ハンドとの接触状態の議論がしやすくなるなどの利点があ



(1) 平面上の方向付き点 方向成分の誤差小
 (2) 円筒形状を構成する方向付き点 一方向に誤差
 (3) 球面、他の曲面を構成する方向付き点 二方向に誤差

Fig.1 方向付き点の持ちうる方向誤差



方向付き点aの負方向に相対点bが存在する aを残す
 方向付き点cの負方向に相対点が存在しない cを消去

Fig.2 相対する方向付き点の探索

る。また、方向付き点群は、密な三次元モデルから容易に生成できるため、ロボットに搭載したカメラや LRF などの外界センサで、自動的に獲得できる。そのため、本研究のような、自律動作を行うロボットでの利用に適している。

3.2 把持計画の流れ

提案する把持計画の流れは、以下のようである。

(1) 形状要素の判別

物体の形状を (1) 平面 (2) 円筒形状 (3) その他、にクラス分けする。

(2) 探索すべき voxel 集団の生成

入力された方向付き点群を voxel 空間に統合し、形状モデルを voxel 集団として再構成する。これにより、方向付き点群の誤差の軽減化と、データ量の削減を図る。

(3) 把持姿勢の候補選出

(1)、(2) の結果から得られた voxel 集団について、ハンドの把持姿勢の候補を探索する。ハンドの指平面と物体との接触面積がなるべく大きくなるような把持姿勢の候補を探す。

(4) 把持姿勢の決定

得られた複数の候補のうち、マンピュレータの動作コストを最小にするものを把持姿勢として決定する。

3.3 探索候補の選出

方向付き点群を基に、ハンドが安定して把持できる箇所を探索する。ただし、方向付き点群はデータ量が多いため、探索量を削減する必要がある。そこで、以下の評価基準を元に方向付き点を評価し、取捨選択する。

3.3.1 形状要素の利用

方向付き点は、位置 (x, y, z) と方向 (n_x, n_y, n_z) を有している。そこで、ここから形状に関する特徴量を抽出する。本研究では、Hough 変換を用いる⁵⁾。具体的には、三次元平面の式 (1) に基づき、方向付き点を Hough 空間へ射影する。

$$\rho = xn_x + yn_y + zn_z \quad (1)$$

この式に従って Hough 変換を行った場合、以下の特性が見られる。

- x-y-z 空間で平面を構成する点群は、Hough 空間上で一点に集中する。
- 円筒形状のように、ある方向に対する曲率が、0 に近い曲面を構成する点群は、Hough 空間では空間曲線状になる。
- 球面や、他の二次曲面を構成する点群は、Hough 空間では平面になったり、曲面状に大きく散らばる。

これより、Hough 空間における方向付き点群の分布を分析し、x-y-z 空間での平面、円筒形状、その他の判別を行う。この判別結果を、個々の方向付き点に付加する。

形状要素は、Fig.1 のように、平面に分類された方向付き点は方向成分の誤差が小さく、円筒に分類された方向付き点は、方向成分の誤差が一方向にのみ大きいなどとするここと、探索処理の削減に役立つ。

3.3.2 voxel 空間への統合

方向付き点群を voxel 空間に統合し、形状モデルを voxel 集団として再構成する。これにより、方向付き点群の誤差を軽減化と、データ量の削減を図る。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の大きさから決定する。

方向付き点を voxel 空間へ投票する処理では、各 voxel には複数の方向付き点が投票されるため、これらの方向成分の平均を取るなどして、代表値を求める。各 voxel の形状要素については、その voxel に投票された各方向付き点が保持する形状要素から、一番多く投票されたものとする。以上より、方向付き点群を、方向と形状要素を付加した voxel 集団に変換する。

3.3.3 相対する voxel の位置と方向成分の調査

本研究では、二つの平行な平面指で物体を挟みこみ、把持動作を行う。この挟みこみが成立するためには、ある voxel に対し、方向成分と垂直に指平面を接触させたとき、その voxel の負方向に、もう一方の指平面とほぼ垂直に接触する voxel が必要である。この voxel を、相対する voxel と呼ぶ。

明らかに把持に利用できない voxel を除去するため、すべての voxel について、相対する voxel の有無を調べる。存在しなければ、現在の voxel を消去する。概念図を Fig.2 に示す。ここでは、相対する voxel の探索範囲を、3.3.1 の結果を元に定める。具体的には、形状要素が平面であれば、その点は方向成分の誤差が小さいと

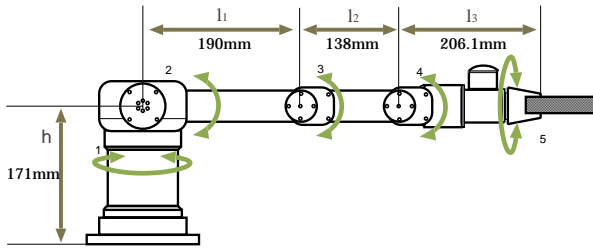


Fig.3 マニピュレータ

見なし、探索範囲をハンドの指部分の横幅分とする。形状要素が平面以外であれば、ハンドの横幅分に、Fig.1に基づく角度分の誤差を加えて、放射状の探索範囲を設定する。

また、相対する voxel が見つかったとしても、voxel 間の距離がハンドの開き幅より大きな場合は、現在の voxel を消去する。

3.4 把持姿勢の探索

前節の処理で得られた voxel 集団について、把持姿勢の探索処理を行う。生き残っている voxel すべてについて、指平面を voxel の法線方向周りに回転させることで探索を行い、把持可能かどうかを調べる。二枚の指平面間の距離がハンドの開き幅よりも小さいか、物体と平面の接触量が所定の閾値以上であるか、の判断基準により、把持姿勢の候補を算出する。以上より、物体を十分に把持可能と判断された把持姿勢を、ハンドの位置座標 (d_x, d_y, d_z) と、姿勢を表すベクトル (a, b, c) をパラメータとして、記録する。この候補は、一般に複数個得られる。

3.5 把持姿勢の決定とプランニング

算出された把持候補の中から、把持姿勢を唯一に決定する。具体的には、(1) 各把持姿勢の候補に対して、マニピュレータが実際に姿勢を取りうるか、(2) 把持姿勢が存在する場合に各関節の動作コストが小さいか、といった二つの基準を元に評価し、動作コストが最小となる把持姿勢を選択する。

動作コストは、マニピュレータ (Fig.3) の動作範囲がなるべく小さくなるよう、関節角 $\theta_1 \sim \theta_4$ の総和とする。関節角は、把持姿勢により指定される手先の位置姿勢から、それぞれ以下のように求められる。(復号同順)

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{l_4 b + d_y}{l_4 a + d_x} \right)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{B}{A} \mp \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 - l_2^2 + (A^2 + B^2)}{2l_1 \sqrt{A^2 + B^2}} \right)$$

$$\theta_3 = \pm \pi \mp \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - (A^2 + B^2)}{2l_1 l_2} \right)$$

$$\theta_4 = \sin^{-1} \left(\frac{h - l_2 \sin \theta_2 - l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - d_z}{l_4} \right) - \theta_2 - \theta_3$$

ただし、

$$A = \frac{a + d_x}{\cos \theta_1} - l_3 \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{a \cos \theta_1 + b \sin \theta_1}{c} \right) \right\}$$

$$B = h - c - d_z - l_3 \sin \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{a \cos \theta_1 + b \sin \theta_1}{c} \right) \right\}$$

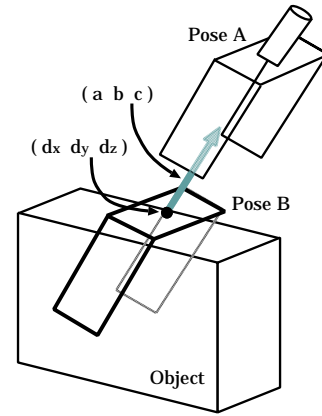


Fig.4 把持動作

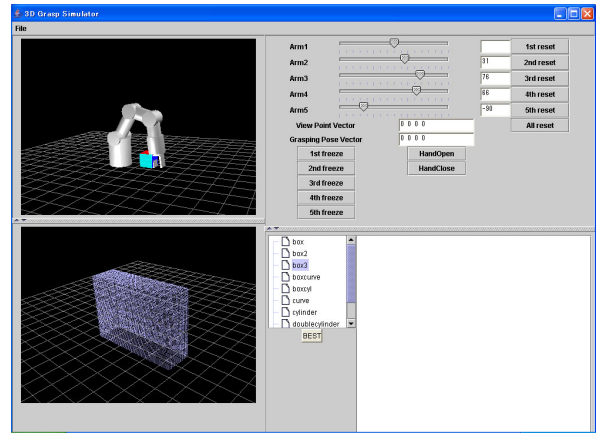


Fig.5 GUI

把持動作のプランニングでは、周りに対象物以外の物体が存在しないとし、基本的な流れを以下のようにする。まず、サブゴールとして、選出した把持姿勢から、ハンドを指の長さ分だけ後退させた姿勢をとる (Fig.4, Pose A)。その姿勢に対して、把持姿勢まで手先を直線追従させ、掌底を物体へ接触させた後、挟み込み把持を行う (Fig.4, Pose B)。

4. 実験

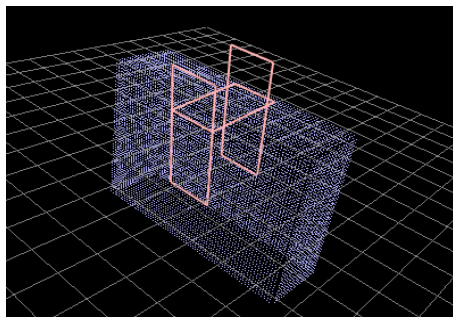
4.1 システム構成

マニピュレータとして、Neuronics 社製の KatanaII (HD-6M) を利用した。KatanaII は、5つの関節を持つアームと、開閉機構を有する二指ハンドで構成される。このマニピュレータとデスクトップ PC (Pentium IV 2.8GHz) をシリアル通信を介して接続し、デスクトップ PC では、把持計画、GUI での表示・入力、把持動作の実行命令を行った。

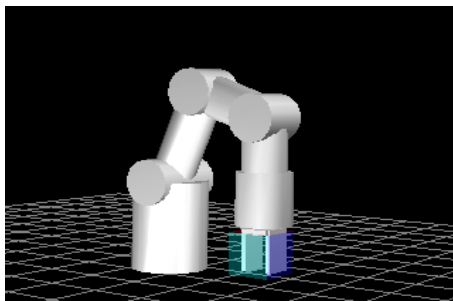
マニピュレータの動作指示は、GUI (Fig.5) を介して行われる。物体のモデルを手で選択し、それを基に把持計画と把持動作を自動で行わせる。GUI では、把持計画の結果の提示や、把持動作のシミュレーションが可能である。

4.2 シミュレーション

本研究の把持計画は、外界センサより得た物体モデルの入力を想定しているため、誤差に頑強な必要があ



決定された把持箇所



把持姿勢

Fig.6 Simulation Result

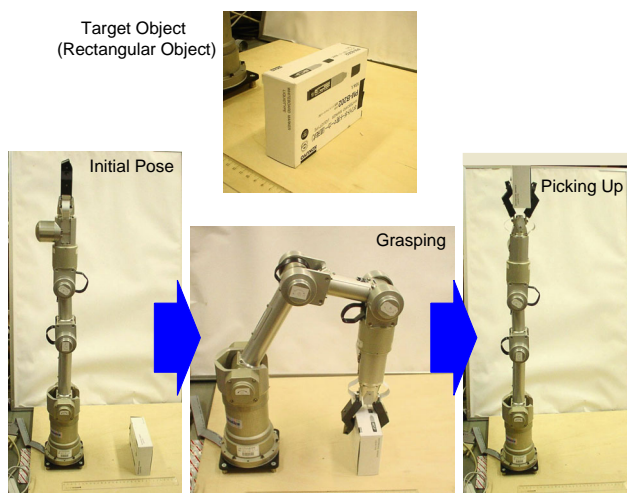


Fig.7 Experimental Result

る。そこで、人手で生成した形状モデルに誤差を与えて、把持のシミュレーションを行い、提案手法による把持姿勢選出の安定性を調べた。

形状モデルは方向付き点群で表されるため、方向付き点の位置成分、方向成分のそれぞれに、正規分布の誤差を与えてシミュレーションを行った。ここでの把持対象物は、40x140x100mmの直方体とし、形状モデルは10400点の密な方向付き点群として定義した。

このシミュレーションでは、安定した把持計画ができるのは、最大位置誤差が8mm、最大角度誤差が24度までであった。これより誤差が小さい場合には、全ての試行で、誤差を与える前の物体モデルと指平面がよく接触するような、ハンドの把持姿勢を見つけることができた。最大誤差を上述の値としたとき、安定した把持姿勢が得られたのは、15回の試行のうち13回に留

まった。

一方で、誤差をこれ以上増やした場合には、把持姿勢の候補は見つかるものの、その姿勢が物体形状に対して斜めになるなど、不安定になることが多くなった。ただし、これらの誤差の影響に対しては、ハンドの姿勢を微調整する処理などを追加すれば、対処できる可能性がある。

4.3 把持実験

構築したマニピュレータシステムにより、物体の把持実験を行った。マニピュレータの200mm前方に、40x140x100mmの直方体を設置した。モデルは人手で生成し、各方向付き点の位置成分に最大5mm、方向成分に最大10度の、正規分布の誤差を与えた。

把持実験では、GUIを起動後、直方体の形状モデルを選択し、以後の把持計画と把持動作を、ロボットに自動で行わせた。把持計画については、把持姿勢の候補算出に6sec、マニピュレータの把持姿勢決定までに、300msecを要した。把持姿勢の候補は229箇所得られ、最終的にFig.6のような把持姿勢が選択された。この結果を基に、Fig.7に示すような把持動作を実現した。

5. まとめ

物体の密な三次元モデルを入力として、物体の把持動作を自律的に行うロボットシステムを構築した。本システムでは、人間が指示した物体に対して、把持計画、把持動作をすべて自動で行うことができる。

今後の課題として、本システムの枠組みを移動マニピュレータに適用することと、形状モデルの自動獲得⁶⁾との関係がある。

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) K. Rahardja and A. Kosaka: "Vision-Based Bin-Picking: Recognition and Localization of Multiple Complex Objects Using Simple Visual Cues", in 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Osaka, Japan, November", 1996.
- 3) 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.
- 4) P. J. Rousseeuw and A. M. Leroy: Robust Regression and Outlier Detection, John Wiley & Sons, New York, 1987.
- 5) 山崎, 友納, 坪内, 油田: 「方向付き点群を利用した幾何形状判断に基づく小型物体の把持戦略」, ロボティクス・メカトロニクス講演会'05, 講演番号 1P2-N-090, 2005.
- 6) 山崎, 友納, 坪内, 油田: 「移動ロボットに搭載したカメラの視点移動による物体の3次元形状モデリング」, 第9回ロボティクス・シンポジウム予稿集, pp.312-317, 2004.