

複数の作業姿勢候補を持つ移動マニピュレータの動作計画

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

Motion Planning for a Mobile Manipulator with Several Grasping Postures

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

Abstract— In this paper a motion planning method for a mobile manipulator is proposed. In general, humans can grasp an object by various way which depends on object posture, position and so on. The objective of this paper is to present how to detect a pose of a mobile manipulator under the condition that several grasp ways are given to the robot. Motion errors and object position errors are considered to detect robot pose in our method because these affect grasp motion of the robot hand. Especially, coping with these error, we will propose effective pose searching method for a mobile manipulator from numerous pose candidates. The performance of the proposed method is illustrated by simulation.

Key Words: Mobile Manipulator, Motion Planning, Position Error, Grasping

1. はじめに

本稿では、移動マニピュレータで小型物体を把持するための動作計画手法を提案する。ここでの移動マニピュレータは、移動台車にひとつのマニピュレータを搭載したシステムであり、以下では、これを「ロボット」と呼ぶ。また、このロボットを構成する「台車」と「マニピュレータ」を明示的に区別する。本手法は、ロボットが物体の掴み方を複数通り持っているとき、それぞれの掴み方に対してロボットが取りうる姿勢を評価し、その結果から一つを決定するものである。

従来、小型の物体を自動で把持し、持ち運ぶ動作を行うロボットが実現されている¹⁾³⁾⁴⁾。これらの研究では、実環境での物体操作の実現や、物体側に情報を持たせることの有用性評価に重きが置かれていた。そのため、物体の操作方法は、あらかじめ与えたりアドホックに決定されるものがほとんどであった。すなわち、物体のどの位置をどのような姿勢で掴むべきかは、従来あまり考慮されていなかった問題である。ここで、人間が物体を掴む動作を考える。人間は、ひとつの物体には様々な掴み方があることを認識しており、その物体の置き方や位置により、掴み方を様々に変えている。このことから、ロボットが物体を掴みあげる際にも、物体には複数とおりの掴み方があるとし、物体とロボットの相対位置などから掴み方を選ぶ方が、動作の安全面、効率面で有利である。

本研究の目的は、物体に数種類の掴み方が与えられた場合に、把持を行うためのロボット姿勢を選ぶことである。把持動作の前に計画を行い、安全に動作を実行可能なロボット姿勢を探す。手先姿勢誤差の修正量を評価基準とする手法⁷⁾を用いて、ロボットが取りうる様々な姿勢から、一つを選び出す手法を提案する。

移動マニピュレータの動作計画では、コンフィグレーション空間が高次元となるため、姿勢探索の効率化が課題となる。従来、RRT(Rapidly-exploring Random Tree)を適用したり⁵⁾、台車とマニピュレータの自由度を分離して考えるアプローチ⁶⁾がある。これらは、ロボットが比較的広い環境を移動することを想定しており、動作の連続性を保ちつつ、障害物を回避するのが主目的である。一方、本研究の動作計画では、把持するとき

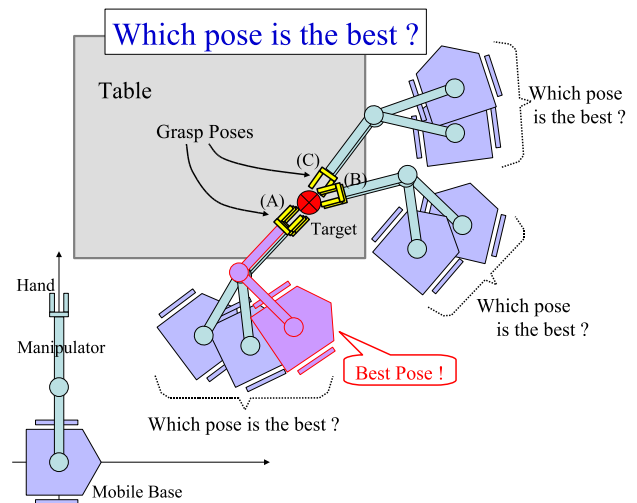


Fig.1 Problem Definition

のロボット姿勢に着目し、これを評価・選択する。ただし、把持動作以前の台車移動により生じる誤差を考慮する。すなわち、把持に至るまでの台車の動きにより手先姿勢に入りうる誤差も変わるため、これを考慮に入れたロボットの姿勢決定法を提案する。

2. 問題設定とアプローチ

2.1 想定タスクと目的

机上に置いてある一つの小型物体を、ロボットが掴みあげる動作を考える (Fig.1)。机の配置などの情報は人手で与えておく。物体には、数通りの掴み方が事前に得られるものとする。また、台車は凹凸のない平面を移動する。

想定する動作の流れは、以下のようである。本研究の目的は、2. に示す動作計画で、移動台車とマニピュレータの姿勢を決めることである。なお本稿では、位置と方位を合わせて姿勢と呼ぶ。

1. ロボットは周囲の環境を観測しながら移動し、事前に持っているモデルを元に把持対象物を発見する。

2. 安全に把持動作が可能なロボット姿勢を探索する。複数の掴み方 (例: Fig.1(A) ~ (C)) について、ロボットが取りうる様々な姿勢を探索し、安全度が一番高いものを選ぶ。
3. 選んだ姿勢を取れる位置まで台車を移動する。その後物体をもう一度観測し、ずれがあった場合は、新しい姿勢を再計算する。
4. 把持を行う

2.2 課題

本研究では、動作計画問題を複雑にする要因として、以下の二つがある。

台車の到達位置・移動経路と姿勢誤差の依存関係

把持を行うとき、把持姿勢を取れる位置まで台車を移動する必要がある。台車姿勢には移動の過程で誤差が入りやすく、これは把持動作に無視できない影響を与える。そのため本研究では、この誤差を事前に見積もり、ロボット姿勢の評価に利用する。これは、マニピュレータに依存する手先の操作性と、台車の移動に依存する手先の姿勢誤差の両方を考慮する問題となる。

自由度増加に伴う探索空間の増大

台車とマニピュレータの合計自由度は、物体操作に必要な自由度よりも多いとする。これにより、ロボットが取りうる姿勢を増やすことができ、また、手先の操作性を高める効果も得られる。一方で、探索すべき姿勢が増えることが問題である。Fig.1 は、手先の目標姿勢を3つ与えた例である。冗長自由度がある場合は、(A) ~ (C) それぞれの把持姿勢に対し、台車の位置を変えることで把持姿勢の候補が無数に得られる。

2.3 アプローチ

前述した課題を解決するために、ロボットの作業空間を大域的に探索しながら、局所で姿勢評価を行うアプローチを提案する。

局所的な姿勢評価

姿勢評価は、文献⁷⁾の手法により行う。これにより、「計画時に得たロボット姿勢をほぼ変えずに、実際の把持動作を実行できること」が判別できる。

この手法は、手先の目標姿勢と台車の位置が与えられることを前提としている。これらは、大域的探索の過程で順次選ぶものとする。すなわち、姿勢評価は、手先姿勢と台車姿勢を固定した上でを行い、その条件下でロボットが取りうる最適な姿勢を求める。

大域的な姿勢探索

大域的姿勢探索では、台車が移動する x-y 平面を細かなグリッドにわけ、それぞれで姿勢評価を行いながら、一番良い評価の得られるグリッドを探す。一つのグリッドを選ぶことは、前述の姿勢評価のために、一組の手先姿勢と台車姿勢を決めることに等しい。探索はすべてのグリッドについて行うのではなく、姿勢評価の性質を利用して効率化する。この詳細は4章に述べる。

3. 移動マニピュレータの姿勢評価

姿勢評価手法⁷⁾の概要を述べる。入力は、手先の目標姿勢と、台車の到達姿勢である。ただし本稿では、把持を行うときの台車の方位は常に同じとする。本章での変数の定義は以下のようなものである。

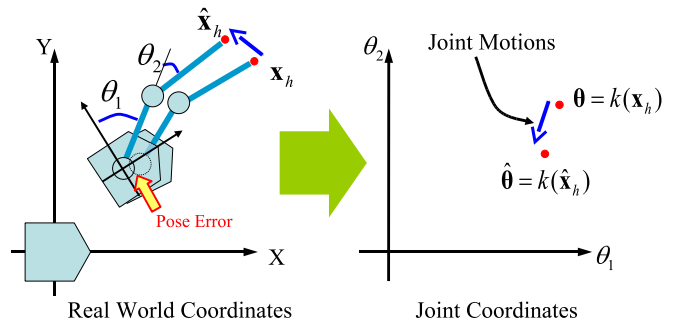


Fig.2 Pose Error

- x_h : 台車を基準とした座標系での手先姿勢
- x_b : 台車を基準とした座標系での物体姿勢
- x_H : 世界座標系での手先姿勢
- x_B : 世界座標系での物体姿勢
- x_G : 世界座標系での台車姿勢

3.1 評価式

姿勢の評価は、マニピュレータの関節変数を軸とした空間で行う。以後、この空間を関節空間と呼び、ロボットが実際に作業を行う空間を作業空間と呼ぶ。姿勢の評価式を、以下のように定義する。評価値 C が小さいほど、良い姿勢である。

$$C = \int |k(x_h) - k(\hat{x}_h)| P(x_h) dx_h \quad (1)$$

\hat{x}_h は手先の目標姿勢である。 $k(x)$ は、手先姿勢 x に対してマニピュレータの逆キネマティクスをとくとき、各関節角 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ を求める関数である。 $P(x_h)$ は、手先姿勢の確率分布である。

式(1)の意味を、平面を動く二自由度マニピュレータの例 (Fig.2) で説明する。誤差がない理想的な状況では、マニピュレータの手先は \hat{x}_h で物体を把持できるが、実際には誤差が入る。そのため、計画通りにマニピュレータを動かしても、Fig.2 の x_h のように、目標とずれた姿勢になりうる。評価の指標は、 \hat{x}_h と x_h の間の姿勢変化で、マニピュレータの各関節の動作量が少ないことである。これは、マニピュレータの関節空間では、Fig.2 右に示す $\hat{\theta}$ と θ の間の距離が小さくなることと等しい。式(1)は、手先姿勢の誤差を確率分布で表現し、その誤差を修正するのに必要な、各関節角の動作量の期待値を求めるものである。

3.2 評価値の算出

姿勢の評価値は、モンテカルロ法を利用して算出する。手順は以下のとおりである。なお、台車姿勢の確率分布 $P(x_G)$ と物体姿勢の確率分布 $P(x_B)$ は、台車の位置が定まった時点で、正規分布として算出しておく。

1. 手先の目標姿勢 \hat{x}_h と台車姿勢 \hat{x}_G を決める。
2. \hat{x}_h について逆キネマティクスを解き、マニピュレータの各関節角 $\hat{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ を求める。
3. 以下の処理を、所定の回数繰り返す。
 - (1) $P(x_G)$ 、 $P(x_B)$ から、ガウス分布に従って x_G 、 x_B をランダムに一つ選ぶ。
 - (2) これらから、誤差を含む手先の姿勢 x_h を得る。
 - (3) この x_h から各関節角 θ を求める。

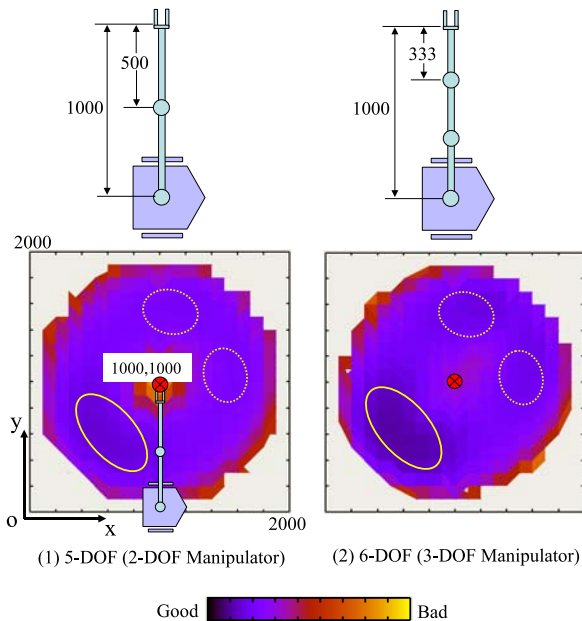


Fig.3 Pose Evaluation

(4) $\hat{\theta}$ と θ の差分の絶対値を求め、その値を C に足し込む。

最終的に得られる C の値が小さい場合、その手先姿勢に良い評価を与える。

4. 大域的姿勢探索

本章では、作業空間内でロボットが取りうる姿勢から、ひとつを決定する手法を提案する。

4.1 概要

3章では、一組の手先姿勢と台車姿勢が与えられたときに、ロボットの姿勢を評価する方法について述べた。しかし、本研究の問題設定では、手先姿勢の候補が複数与えられる。また、ロボットが冗長自由度を有するため、ロボットの姿勢は無数に存在する。

これに対し本研究では、台車が移動する x - y 平面を離散的に区切り、各台車の姿勢ごとにマニピュレータの姿勢を最適化する。具体的には、以下の方針をとる。

- ひとつの手先姿勢に対してひとつのロボット姿勢を決める処理を、手先姿勢の候補数だけ繰り返す。
- 各手先姿勢ごとに、台車の作業空間を細かいグリッドに分け、各グリッドごとに姿勢評価を行う。最適なロボット姿勢が得られるグリッドを探す。
- 全ての手先姿勢について評価が終わった後、一番良い評価が得られたロボット姿勢を採用する。

前述したように、一回の姿勢評価は、台車姿勢を固定して行う。それぞれの姿勢評価では、指定された台車姿勢と手先姿勢に対して、マニピュレータの姿勢が最適化される。そのため、最終的なロボット姿勢は、グリッドの粗さに依存した解像度で得られる。

4.2 姿勢探索の効率化

Fig.3 は、文献⁷⁾に提案される手法で姿勢評価を行った例である。全長 1000[mm] の平面マニピュレータを搭載したロボットが初期値 $(x, y) = (0, 0)$ にあると想定し、手先の目標姿勢を $(x, y) = (1000, 1000)$ に設定した。物

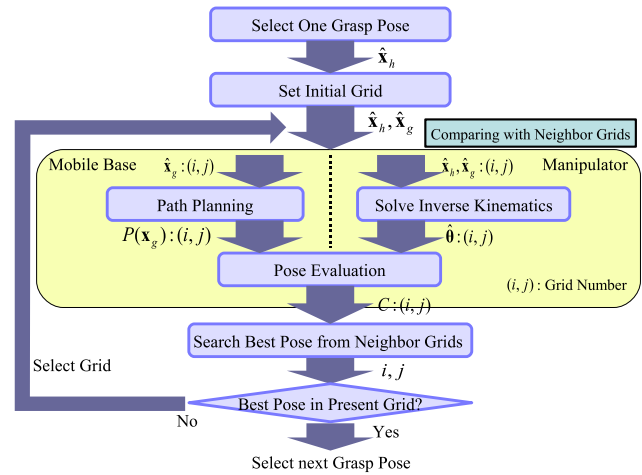


Fig.4 Planning Algorithm

体は、どの方向からでも掴めることとした。Fig.3 では、台車の姿勢に対する評価値の分布を示している。ここでは、台車が各グラフの実線領域にあるとき、良い姿勢評価が得られる。ただし、点線で示すように、評価値の分布は極値を持つ場合がある。これは、手先姿勢に入りうる誤差の分布に対して、マニピュレータの操作性が特に高い領域が複数存在するためである。また、評価値は台車の位置が変わるのに従い、滑らかに変化することが判る。

この性質から、以下の方針で姿勢探索を効率化する。

- すべてのグリッドについて姿勢評価を行うのではなく、適当なグリッドを初期値として選び、隣接するグリッドを辿る方針をとる。評価値の分布は滑らかに変化するため、良い評価値のグリッドを辿れば、最適値もしくは極値に到達できる。
- 上述の処理を、初期値を変えながら 10~20 回繰り返す。評価値の分布は極値の数がそれほど多くないため、この試行の中で一番良い評価値を見つければ、それが最適値である可能性が高い。

4.3 アルゴリズム

姿勢探索処理は、以下の流れで行う。

1. 手先姿勢の候補を一つ選ぶ。
2. 作業空間を x - y 平面のグリッドに分け、机などの物体領域に位置するグリッドを除く。残ったグリッドのうち、手先姿勢に対して逆キネマティクスの解が得られるものを除く。
3. 残ったグリッド群からランダムに一つを選び、以下を試行する。
 - (1) そのグリッドでロボットの姿勢評価を行う。すなわち、手先の姿勢誤差 $P(x_h)$ を見積もり、これに対するマニピュレータの修正動作量の期待値 C を求める。
 - (2) 同時に、8 近傍のグリッドについても同様に姿勢評価を行う。
 - (3) 現在のグリッドよりも評価値が小さいグリッドが近傍に見つければ、そのグリッドへ移動し、(1)に戻る。現在のグリッドでの評価が一番よければ、試行を終了する。

4. 3. の処理を所定の回数行い、一番小さな評価値が

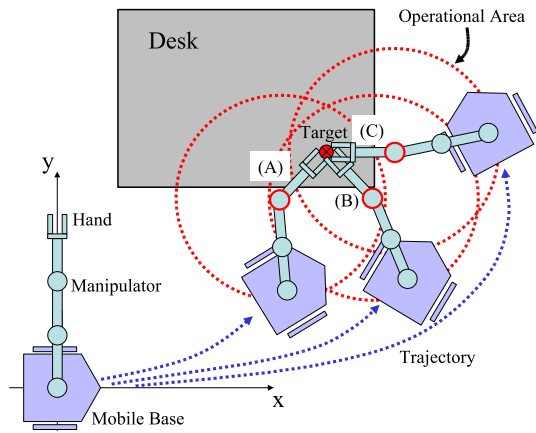


Fig.5 Experiments

得られたグリッドを保存する。

これを全ての把持姿勢候補に対して行い、一番評価の良かったグリッドでのロボット姿勢を得る。処理の流れを Fig.4 に示す。

5. シミュレーション

提案手法の検証のために、シミュレーションを行った。平面を移動する台車に、三自由度マニピュレータを搭載したロボットを考え、手先の目標姿勢として、Fig.5(A)~(C)の3つを与えた。手先の角度は、 x 軸に対してそれぞれ(A)45[deg]、(B)135[deg]、(C)180[deg]である。また、環境中には机があることを想定し、台車が走行できない範囲も設けた。

この設定では、マニピュレータの第三関節は手先姿勢によって固定されるため、求めるべき変数は、マニピュレータの残り二関節と台車姿勢である。すなわち、台車の作業領域は、Fig.5の赤線で示すような第三関節を中心とした円領域から、机などの領域を除いた部分である。動作計画では、台車の初期姿勢の誤差として、 x, y 方向に $1\sigma=10$ [mm]、角度方向の $1\sigma=15$ [deg]を正規分布で与えた。物体の姿勢誤差は、 x, y 方向に $1\sigma=5$ [mm]として正規分布で与え、方位には誤差を与えなかった。台車の経路は、人工ポテンシャル法²⁾を用いて求めた。

Fig.6は、台車の作業空間を一边50[mm]のグリッドにわたった場合に、すべてのグリッドについて姿勢評価を行った結果である。ここでは、 $(x, y) = (1850, 650)$ [mm]を中心とするグリッドで、一番良い評価が得られた。処理時間は、3つの手先姿勢候補に対して、合計で14.5[sec](Pentium IV, 2.8GHz)であった。一方で、4章に述べたアルゴリズムを適用した場合、最適なグリッドは同じものが選ばれ、処理時間は1.6[sec]であった。本シミュレーションでは、4.3に述べたグリッドのランダム選択は、20回行った。また、姿勢評価でのパーティクルは1000個とした。この結果より、本手法では、動作計画を10倍近く高速化できた。

6. まとめ

本稿では、手先の目標姿勢が複数ある場合の、移動マニピュレータの動作計画について述べた。提案手法では、ロボットの作業領域を大域的に探索しながら、局所的な姿勢を評価することで、準最適な姿勢を決定する。シミュレーションを行い、その有効性を示した。

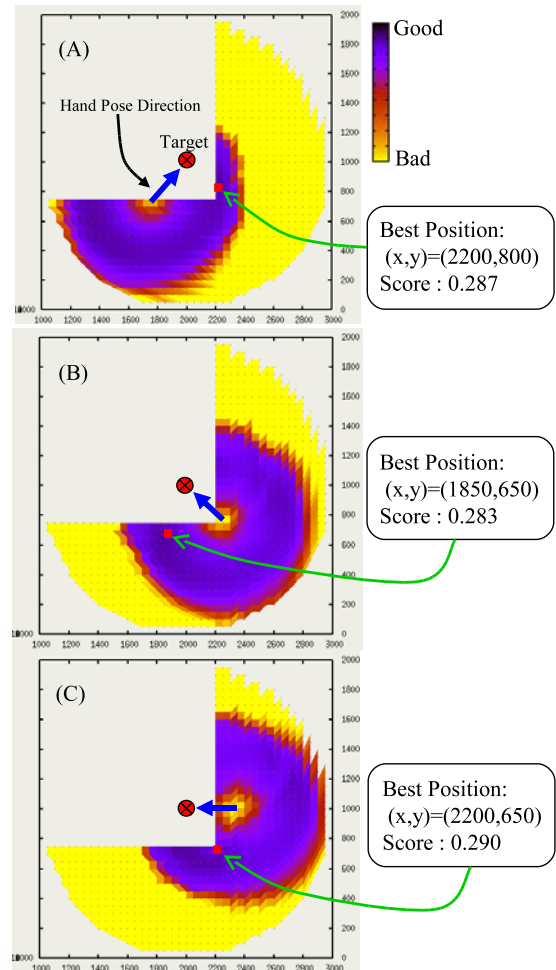


Fig.6 Simulation Result

今後の課題として、処理の高速化と、実際のマニピュレータシステムへの適用がある。

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) C. Connolly, J. Burns and R. Weiss: "Path Planning using Laplace's Equation", Proc. Int. Conf. on Control, Automation, and Systems, pp.2102 - 2106, 1990.
- 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) 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.
- 5) O. Brock and L. Karvraki: "Decomposition-based Motion Planning: A Framework for Real-time Motion Planning in High-dimensional Configuration Spaces", Proc. 2001 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1469-1474, 2001.
- 6) G. Orilio and C. Mongillo: "Motion Planning for Mobile Manipulators along Given End-effector Paths", Proc. 2005 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.2166- 2172.
- 7) 山崎, 友納, 坪内, 油田: 「手先姿勢誤差の修正量評価に基づく移動マニピュレータの姿勢評価」, 第24回日本ロボット学会学術講演会, 2006.