

3次元環境下での複数移動ロボットによる物体搬送経路計画

Path Planning for Transport System by Multiple Mobile Robots in a 3-D Environment

福地 正樹 (東京大学)
正 太田 順 (東京大学)

山下 淳 (東京大学)
正 新井 民夫 (東京大学)

河野 功 (東京大学)

Masaki FUKUCHI
Jun OTA

Atsushi YAMASHITA
Tamio ARAI

Kou KAWANO

The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656 Japan

In this paper, we propose a new path planning method for transport system by multiple mobile robots in a 3-D environment. The essence of this method is to reduce the dimensions of configuration space using the feature of the transportation by mobile robots, and to take the cost of the operation into account as the estimation function for search. We can find a solution with searching in this smaller dimensional configuration space using the potential function defined over the configuration space. And the path constructed by this method is easy to implement with mobile robots.

Key Words: Path Planning, Transport System, Multiple Mobile Robot, Octree, Potential

1 はじめに

搬送経路計画は、ロボットが3次元環境下を障害物と衝突せずに目的を達成する為に非常に重要である。本稿では、物体の周囲上を把持する複数の移動ロボットがその把持位置と物体姿勢を変化させながら物体を搬送する問題の経路計画を行う。これまでに多くの経路計画手法が提案されている¹⁾²⁾。しかし、その多くがPiano Mover's Problemに代表されるような物体だけの経路計画であり搬送者もしくは搬送ロボットは考慮していない。このため得られる経路は移動ロボットによる物体の操作を考慮していない経路であり、実際にこの経路を実現することは非常に難しい。また移動ロボットを考慮した計画は、計画すべきコンフィギュレーション空間¹⁾(以下C空間)の次元が高くなるため計画自体も困難となっている。

そこで本稿で我々は、移動ロボットによる物体搬送に対する経路計画を物体の操作も考慮した形で計画する手法を提案する。具体的には、移動ロボットによって作業を行う際の特徴を考慮することによりC空間の再構成を行い、計画すべき移動ロボットと搬送物体の自由度を減少させる。この次元が縮退したC空間内をポテンシャルを評価関数として探索することにより搬送経路を発見する。また、計画時に移動ロボットによる物体持ち替え及び姿勢変化等の操作を考慮することにより実際の作業時において遂行性の高い経路が生成される。

2 問題設定

この問題に対する問題設定を以下に挙げる。

1. 搬送物体は多面体
2. ロボットは円柱
3. 物体の搬送は物体の一面を床面に接触させて行う
4. 物体の姿勢変化は物体の稜線を床面に接触させて行う
5. ロボットは対象物の周囲上の一点を把持する

移動ロボットによる物体搬送問題は、潜水艦や自由飛行物体の経路問題、アームによる組み付け経路問題とは異なり、移動ロボットでは実現可能な操作は限定されており、複雑に姿勢を変化させながら物体を搬送する経路は実現できないため、以上のような問題設定は妥当である。

3,4,5により、物体の搬送経路は物体の位置を変化させる並進操作と物体の姿勢を変化させる姿勢変化操作の連続的なつながりとして求められ、対象物を複雑に変化させながら物体を搬送するような移動ロボットによって実現困難な搬送経路はこの時点で除外されている。

3 計画手法

3.1 octree形状表現

本手法ではすべての形状表現にoctree表現を用いる。octree表現はgrid表現に比べセルの数を比較的少なく抑えながら正確な物体形状表現が可能である。本手法では、搬送物体と移動ロボットが並進移動時にはその形状が変化しないことを利用し搬送物体と移動ロボットを一つの物体としてoctree表現する方法を用いる(Fig.1(b))。環境も同様にoctreeにより表現される(Fig.1(b))。環境をoctree表現することによって、初期位置と終端位置を結ぶ障害物と接触しない経路は自由空間を表すセルの並びとして効率的に見つけることができる。また、物体と移動ロボットと環境がすべて同じoctreeによって表現されているので、お互いの干渉チェックはセルの重なりにより容易に検出可能である。

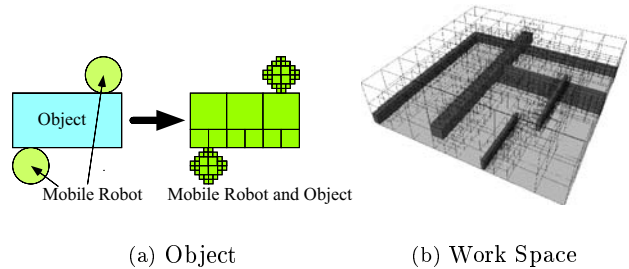


Fig. 1: Cell Decomposition Representation

3.2 探索空間の生成

本稿で扱う物体・移動ロボットはFig.2で与えられる。 q_1, q_2 は床面に水平方向の移動を表し、 q_3 は高さ方向の移

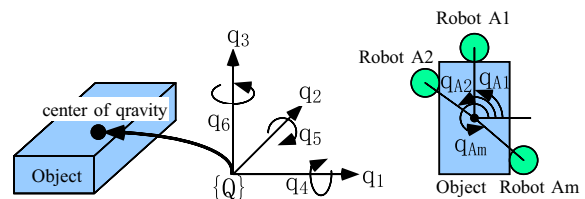


Fig. 2: Coordinates

動を表す。 q_6 は物体を上から見た回転姿勢を表し、 q_4, q_5 はそれぞれ q_1, q_2 軸回りの回転を表す。 $q_{A1} \sim q_{Am}$ は、各移動ロボットの把持位置を表す。物体と移動ロボットの自由度により構成されるC空間は、物体姿勢の自由度が6、 m 台の移動ロボットの自由度が $1 \times m$ 、合計 $(6 + m)$ 次元となり、

高次元のC空間内での探索が必要となる。

ここで、2節で述べたように、実際には可能な操作は限定されている。このことを利用して、実際には不可能な操作に関しては、計画時に探索を行わないこととする。つまり、 q_3, q_4, q_5 は3,4により、搬送物体の一面は床面と接触していることから、物体の搬送姿勢を表す自由度 q_{pose} として1自由度で表すことができ、 $q_{A_1} \sim q_{A_n}$ は周囲上に与えられた把持位置を持つ移動ロボットの配置の自由度 q_{robot} として表すことができる。

q_1, q_2 に関しては、ctree表現された環境の自由空間を表すセルとして離散化する。 q_6 は平面内での回転角 2π を希望の角度 $\frac{2\pi}{n}$ 度ずつ n 分割し離散化する。

したがって、搬送物体と移動ロボットにより構成される $(6+m)$ 次元C空間は、新たに以下の離散的な5つの自由度が構成する5次元C空間として再表現される。

- q_1, q_2 : 並進搬送の自由度
- q_6 : 平面内での回転姿勢の自由度
- q_{pose} : 物体搬送姿勢の自由度
- q_{robot} : ロボット配置の自由度

経路探索はこの5次元C空間を探索空間として行われる。あるコンフィグレーションから遷移可能な隣接コンフィグレーションは、上記の5自由度の内1つの自由度だけを変化させたものとする。

3.3 ポテンシャル場の生成

本手法では探索のヒューリスティックとしてポテンシャルを用いて探索する。ポテンシャル場は、障害物からの斥力とゴールからの引力の合成により表現され、障害物からできるだけ遠くを通過してゴールへと向かう経路を生成するために良く用いられる³⁾⁴⁾。

本手法では、octree表現された環境に対するポテンシャル場として⁵⁾で用いられている関数を採用することとする。環境内のある点 x に生成されるポテンシャル場 P_W は、障害物内で最大値をとり自由空間では障害物からの距離に応じて減少する斥力ポテンシャル P_{rep} とゴールへの引力を表すポテンシャル $P_{att}(x)$ により次式で表される。

$$P_W : x \in W \quad P_W(x) = P_{rep}(x) + P_{att}(x) \quad (1)$$

Fig.3に2次元環境に張られたポテンシャル場 P_W を示す。

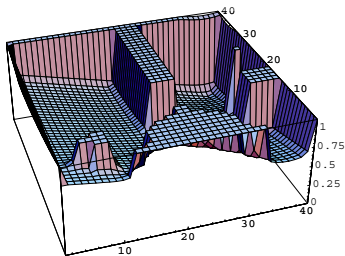


Fig. 3: Potential Field P_W in 2-D Environment

3.4 経路探索

本手法では、経路は3.2節で再構成したC空間内をポテンシャル $U(q)$ をヒューリスティックとした探索により求める。あるC空間内のコンフィグレーション q に対するポテンシャル $U(q)$ は、 q に対応する移動ロボットと搬送物体が環境内で受けるポテンシャル値 P を用いる。移動ロボットと搬送物体は octree により立方体 (object node O_i) の集合として表現されており、この物体に対するポテンシ

アル $U(q)$ は各 object node O_i に対する環境に張られたポテンシャル P_W 総和として次式で算出される。

$$U : U(q) = \sum_{i=0}^k P_W(O_i) \quad (k : \text{objectnode 数}) \quad (2)$$

また、本手法では実際の作業時において遂行性の高い経路を生成するために、移動ロボットによる物体持ち替え及び姿勢変化等の操作コストを計画時に考慮する。あるコンフィグレーション q_i から q_{i+1} までの操作に必要なコストとして $C(q_i, q_{i+1})$ を定義し、3.2節で定義した探索空間内で、スタートからゴールまで次式の評価関数 f が最小となる解を求める。

$$f = \sum_{i=0}^s U(q_i) + \sum_{i=0}^{s-1} C(q_i, q_{i+1}) \quad (s : \text{pathstep 数}) \quad (3)$$

操作コスト $C(q_i, q_{i+1})$ を操作にかかる時間として評価する。並進移動、平面内での回転、搬送姿勢変化、持ち替えの各操作に必要な時間に応じて遷移の際のアークを分割し、分割された各点でのポテンシャル和を操作コスト $C(q_i, q_{i+1})$ として用いた。つまり、時間がかかる操作は細かく分割されるため結果として操作コストは大きく設定される。

4 シミュレーション

提案手法によるシミュレーション結果を示す。

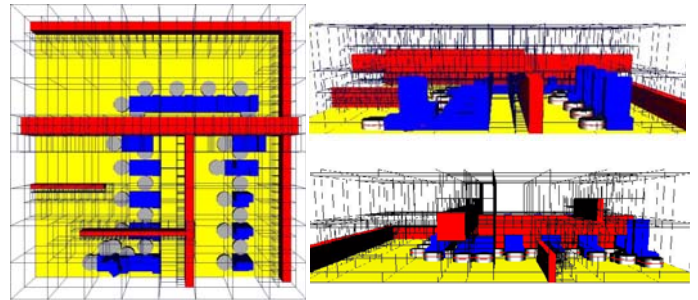


Fig. 4: Simulation Result

2台の移動ロボットがL字型の搬送対象物を障害物と接触せずに、物体姿勢とロボット配置を変化させながら、目的の位置まで搬送する経路が得られていることが確認できた。

5 おわりに

3次元環境下での複数移動ロボットによる物体搬送の為に経路計画手法を提案した。移動ロボットによって作業を行う際の特徴を考慮することによりC空間の再構成を行い、計画すべき移動ロボットと搬送物体の自由度を減少させ、この次元が縮退したC空間内をポテンシャルと操作コストを考慮した評価関数により探索し経路の生成を行った。

参考文献

- 1) J.C.Latombe : "Robot Motion Planning", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991.
- 2) Y.K.Hwang and N.Ahuja : "Gross Motion Planning - A survey", ACM Computing Surveys, Vol.24, No.3, pp.219-292, 1992.
- 3) J.Barraquand et.al. : "Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach", International Journal of Robotics Research, MIT PRESS, pp.628-649, 1991.
- 4) Y.K.Hwang, N.Ahuja. : "Potential Field Approach to Path Planning", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.8, No.1, pp.23-32, 1992.
- 5) 北村喜文, 田中貴秋, 岸野文郎, 谷内田正彦. "octree とポテンシャル場を用いた三次元環境での経路計画", 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.8, pp.1186-1193, 1996.