

## 移動ロボット群による大型物体搬送計画\*

山下 淳<sup>\*1</sup>, 福地 正樹<sup>\*2</sup>, 太田 順<sup>\*3</sup>  
新井 民夫<sup>\*3</sup>, 浅間 一<sup>\*4</sup>Motion Planning for Cooperative Transportation of a Large Object  
by Multiple Mobile RobotsAtsushi YAMASHITA, Masaki FUKUCHI, Jun OTA<sup>\*5</sup>,  
Tamio ARAI and Hajime ASAMA<sup>\*5</sup>Department of Precision Machinery Engineering, The University of Tokyo,  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

In this paper, we propose a motion planning method for cooperative transportation of a large object by multiple mobile robots in a complicated environment. We must plan the motions of the object and mobile robots to avoid obstacles in a three-dimensional environment. A computation time to solve this problem is exploded, since we need search a solution in a high dimensional configuration space (C-space). Accordingly, we reduce the dimensions of C-space using the feature of the transportation by multiple mobile robots. In our method, all things (the object, the robots and the obstacles) are represented by an octree that is the approximate cell decomposition method for a three-dimensional environment. We can find a solution with A\* search algorithm in this smaller dimensional C-space using the potential field. We verify the effectiveness of our proposed motion planning method through simulations.

**Key Words:** Moving Robot, Mechatronics and Robotics, Intelligent Equipment, Multiple Mobile Robots, Motion Planning, Cooperative Transportation, Octree, Potential

## 1. 序 論

近年, 工場や建築現場などで移動ロボットによる自律作業に対する期待が高まっている。これらの場所での機材の搬入・搬出作業では, ロボット自身よりも大きな物体を取り扱うことがあるため, 移動ロボット群で協調して搬送することが有効である。このとき, 障害物を回避するために, 通路の幅に加え天井の高さなどを考慮し, ロボットが物体を把持する位置や搬送物体の姿勢を変化させ, 柔軟に物体を搬送するための搬送物と各ロボットの挙動を決定する必要がある(図1)。この作業手順を人間が逐一指示することは手間がかかり困難であるため, 動作計画が重要となる。

移動ロボット群による協調搬送作業については, 搬送物に過大な内力を加えずに目標軌道を追従するため

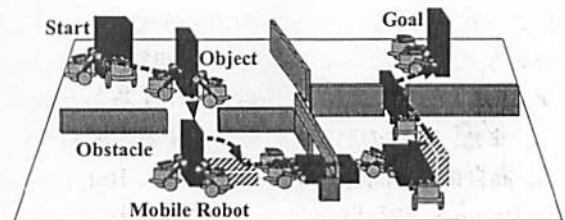


Fig. 1 Cooperative transportation by multiple mobile robots in a 3-dimensional environment

の制御手法<sup>(1)</sup>や, 狭い場所を通り抜ける際にロボットが搬送物を持つ位置を変化させて障害物を回避するための動作計画方法<sup>(2)</sup>が提案されている。しかし, これらの研究では, ドアを通りぬける際の横幅など2次元平面上での制限は考慮されているが, 高さ方向の制限は考慮されていない。つまり, 3次元環境を考慮した協調搬送手法は提案されていない。

本論文では, 3次元複雑環境における移動ロボット群での協調搬送計画手法を構築することを目的とする。3次元空間における搬送物の自由度(DOF)は

\* 原稿受付 2001年3月31日。

<sup>\*1</sup> 静岡大学工学部(☎432-8561 浜松市城北3-5-1)。<sup>\*2</sup> ソニー(株)(☎141-0001 東京都品川区北品川6-7-35)。<sup>\*3</sup> 正員, 東京大学大学院工学系研究科(☎113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)。<sup>\*4</sup> 正員, 理化学研究所(☎351-0198 和光市広沢2-1)。

E-mail: tayamas@ipc.shizuoka.ac.jp

6DOF (並進 3DOF, 回転 3DOF) であり, 移動ロボットは平面内を移動するため 1 台当たり少なくとも 3DOF (並進 2DOF, 回転 1DOF) である. 更に物体操作用ハンド等の運動も考慮する必要があるため, ロボット群と搬送物の間の拘束自由度を考慮した場合でも, ロボット台数を  $m$  とすると, 合計  $(6+3m)$  以上の自由度を有する非常に高次元の動作計画問題となる. また, 対象物は移動ロボットによって搬送されるため, 操作対象物と操作者の挙動を同時に計画する必要がある. よって, 搬送物は必ずしも自由な挙動を行えるわけではなく, ロボットによって操作される際の制約条件が存在する. 搬送作業では, 無意味に対象物を複雑に操作しながら搬送する動作を計画することは望ましくない. 探索の速度よりも, 実際の搬送にかかる時間及びその簡単さが問題となる. このことは最適解を算出する必要があることを意味する.

計画すべき自由度の高い問題を効率的に解く手法は数多く提案されており, 従来の方法では, 探索空間をノードとアークから構成されるグラフで離散的に表現し, スタートノードからゴールノードまでの経路を求めることにより高次元の動作計画問題を解決している<sup>(4) (5)</sup>. 北村らは, 3次元空間において単体の自由飛行物体が障害物と接触しないための経路を求める手法を提案している<sup>(6)</sup>. しかし, 経路探索の手法が単純であるため, 搬送物と複数ロボットを同時に考慮する必要がある高自由度の動作計画問題にそのまま適用することは困難である. また操作計画の組み込みがなされていない. 解の探索空間を確率的に構成する手法も提案されており<sup>(7)</sup>, 高次元の探索問題を解決することが可能である. この手法では高速な探索が可能であるが, ランダムな探索を行うため最適解を算出することができない. また, 前述の制約条件を考慮することも困難である. 高自由度の問題を解決するために, Randomized Path Planner と呼ばれる手法<sup>(8)</sup>も提案されている. この方法は, C空間<sup>(3)</sup>を陽に計算せず, 実空間において物体間の干渉チェックを行っているため, 非常に高次元の問題に対応可能である点で優れた手法である. しかし, 計画すべき物体のどの場所を代表点 (制御点) として計画すれば良いかを設計者が逐次決める必要がある. また, ランダム探索に基づいているため, 最適解を得ることができない.

一般に, ノードとアークから構成される探索空間において, あるノードを通る経路の良し悪しは, そのノードが実空間でどの程度障害物から離れているかなどで評価されることが一般的である. それに対して本論文で取り扱う問題では, あるノードから, 障害物か

らの距離が等しい 2つの隣接ノードに移動することを考えた場合, 搬送物の姿勢を変化させずに搬送することに対応する隣接ノードに移動するとき, 搬送物の姿勢を 3次元的に変化させることに対応する隣接ノードに移動するときでは, 作業の困難さが大きく異なる. つまり, 従来の問題では, すべてのノードとアークが均質なグラフにおける探索問題であったことに対し, 本論文では, 不均一なコストを持つアークで構成されるグラフにおける探索問題となる. つまり, アークのコストの評価が重要であり, 最適解を算出することが重要となる.

そこで本論文では, 移動ロボット群による搬送作業における制約条件を考慮して探索空間を構築し, 効率的な環境表現方法である Octree を採用することで, 高次元の問題に対応する. また, 与えられた評価関数に対して完全かつ高速に最適解を発見することが可能な  $A^*$  探索<sup>(9)</sup>を用いる.  $A^*$  探索では, ゴールまでの見積もりをコストをヒューリスティクスとして設計するが, この設計が探索の効率を決定する. Octree で表現された環境では, 障害物に近いほど, セルの大きさが細かくセル数も多くなるため, 探索時に展開するノード数が多くなる. また, 探索次元の指数乗に比例した計算量となるため, 作業の性質に応じた次元の縮退と, 適切なヒューリスティクス関数の設計が必要である. そこで, 探索空間の次元を搬送作業の性質を用いて縮退する. 更に, 障害物からの距離が離れた安全な経路を最適解として設定し, 障害物からの距離をとりつつゴールまでの距離を考慮した Skeleton Wavefront ポテンシャルを新たに設計して用いることで, 展開ノード数を抑えて最適解を求める手法を提案する.

また, 狭い場所を通り抜ける際には, 搬送物の姿勢を 3次元的に変化させる操作が必要である. 物体操作時には力学的条件を考慮せねばならず, 高次元探索空間における経路計画と性質の異なった動作計画を行うことが必要となるが, この問題に対しては Local expert と呼ばれる<sup>(3) (10)</sup>局所的に専用の計画器を準備するアプローチを採用することとする.

## 2. 問題の定式化

本論文では, 複雑環境における複数移動ロボット群による大型物体搬送作業の実現を目指し, その動作計画手法を構築することを目的とする.

2.1 問題設定 環境・移動ロボット・搬送対象物に関する前提条件は以下の通りとする.

### • 環境

- 複数の障害物が存在する 3次元環境

- 障害物は任意形状の多面体
- 障害物の形状・位置・姿勢は既知
- 移動ロボット
  - 全方向移動可能
  - $m$  台の移動ロボットが物体の周囲上を把持して搬送物を搬送
- 搬送対象物
  - 形状は任意の多面体で既知
  - 重心位置・質量などの性質は既知

2.2 搬送作業の概要

移動ロボット群は、様々な動作を繰り返して搬送物を目的地に搬送している。しかし、搬送物の動きに注目して考えると、移動ロボット群の動作は、4種類の基本的な動作とその組み合わせで表現することが可能である(図2)。基本動作をそれぞれ、位置変化、方向変化、姿勢変化、配置変化と呼ぶこととする。

位置変化は、水平面内での搬送物の位置を変化させる基本動作である(図2(a))。方向変化は、鉛直軸まわりの搬送物の姿勢を変化させる基本動作である(図2(b))。ただし、搬送物を各移動ロボットが把持する位置は変更しないものとする。姿勢変化は、鉛直面内の(横から見た)搬送物の姿勢を変化させる基本動作である(図2(c))。この基本動作では、ロボットの配置や搬送物の位置も同時に変化したが、上から見た搬送物に対するロボットの配置(ロボットが搬送物をどの方向から把持しているか)は、動作前と動作後で同じとなるように、ロボットが移動するものとする。配置変化は、各移動ロボットが搬送物を把持する位置を変化させる基本動作である(図2(d))。

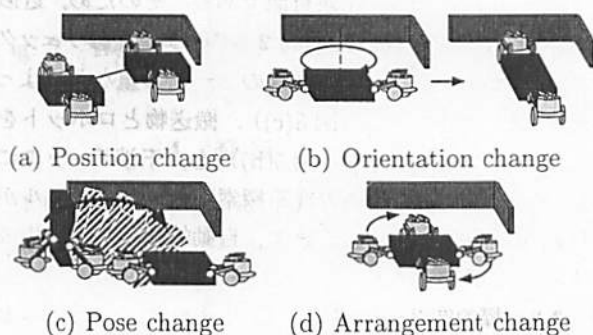


Fig. 2 Four primitive operations of transport task

これらの基本動作の組み合わせで、搬送作業を遂行することが可能である。本論文では、基本動作は同時に行わず、シーケンシャルに行うものとする。例えば、搬送物の位置を変化させつつ(位置変化)、各ロボットが搬送物の把持位置を変更する(配置変化)ことはない。この場合には、位置変化を行ってから配置変化を行うか、配置変化を行ってから位置変化を行うこと

で対応する。これは、これらの基本動作を同時に行える機構は非常に複雑となることが予想され、かつ現実問題として、これらの基本動作を同時に行うと、搬送物を落下させる危険性や、倒してしまう危険性が非常に高くなるためである。

位置変化、方向変化、配置変化を行う際には、搬送物の1面が床面と水平となっており、力学的安定性が常に満たされるのに対して、姿勢変化ではそれが満たされない。そこで、姿勢変化については、Local expertを用いて計画を行うこととする。Local expertは、姿勢変化を行う際の各ロボットの挙動と、その操作に必要な時間・その作業を行うために必要な空間の広さを算出可能である計画器であれば良い。作業に必要な時間はその操作の困難さを評価するために用い、必要な空間の広さは障害物との干渉チェックに用いる。本論文では、筆者らが提案した移動ロボット群による物体操作計画器<sup>(11)</sup>を採用する。

3. 探索空間の構築

本論文では、効率的な探索を行うため、協調搬送作業の性質を用いて探索空間(C空間)の次元の縮退を行い、縮退されたC空間の離散化を行うことで、探索空間をグラフ表現する。ノードとアークから構成されるグラフにおいて、次章で述べるA\*探索を行うことでスタートノードからゴールノードに至る解を得る。

3.1 探索空間の再構成 移動ロボット群による搬送作業における探索空間(C空間)の次元は、前述の通り(6+3m)DOFである(図3(a))。

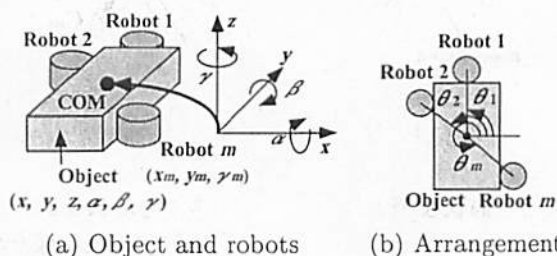


Fig. 3 DOFs of the object and mobile robots

ここで、4種類の基本動作を行った際の自由度(位置変化  $C_{pos}$ 、方向変化  $C_{ori}$ 、配置変化  $C_{rob}$ 、姿勢変化  $C_{face}$ )について考慮し、自由度を縮退する。

位置変化  $C_{pos}$  については、搬送物の水平面内の自由度の変化  $(x, y)$  に相当する。従って、 $C_{pos} = (x, y)$  となり、2DOFである。方向変化  $C_{ori}$  については、搬送物の水平面内の姿勢の変化  $\gamma$  に相当する。従って、 $C_{ori} = \gamma$  となり、1DOFである。配置変化  $C_{rob}$  については、ロボット  $i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) の位置  $(x_i, y_i)$ ・姿勢の変化  $\gamma_i$  の変化  $(x_i, y_i, \gamma_i)$  に相当する。ここで、各

ロボットは搬送物の周縁部を把持していることから、搬送物の重心から見た角度 $\theta_i$ で表現できる(図3(b))。従って、 $3m$ DOFを $m$ DOFとして表現することが可能である。更に、搬送物の把持可能な位置は、搬送物とロボットの大きさ、形状、重心位置などによって限定される。従って、ロボット1からロボット $m$ までのすべての把持位置を配置としてとらえ、1DOFとして表現することが可能である。つまり、 $3m$ DOFを1DOFとして表現することが可能である。

姿勢変化 $C_{face}$ については、搬送物の高さ $z$ と姿勢 $\alpha, \beta$ に相当する。本論文では、安定状態で搬送物を搬送するため、搬送時には床面と搬送物は必ず面で接触している。従って、床面と接触している搬送物の面(底面)で表現することが可能であり、3DOFを1DOFで表現することが可能である。

以上、実際問題として移動ロボット群によって任意の搬送物操作ができず、図2に示した特定の操作のみ行えると考えることによって、 $(6+3m)$ DOFの探索空間を5DOFに縮退することができ、全探索空間 $C_{all}$ は部分探索空間により、 $C_{all} = (C_{pos}, C_{ori}, C_{rob}, C_{face})$ と表現することができた(図4)。

ここでは、探索空間の縮退時に、経路探索に不必要な自由度を縮退したことにより、効率的かつ物理的制約条件を考慮した探索が可能となる。

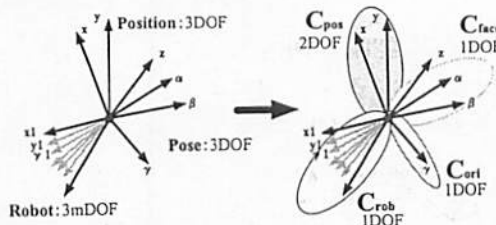


Fig. 4 Reconstruction of C-space

**3.2 形状表現方法** 3次元物体の形状を表現する方法として、グリッド、CSG、境界表現など様々な表現方法が提案されている。しかし、表現可能な形状に制約があるものや、膨大なメモリ容量、計算量を要するものなど、それぞれに一長一短があるため、用途に応じて適した表現方法を選ぶ事が肝要である。

本論文では、この3次元形状表現手法として近似セル分解の1種であるOctreeによる表現を用いることとした。近似セル分解は、物体全体を再帰的に小さなセルに分割していくことによって、物体を大きさの異なるセルの集合として再表現する手法である。任意形状物体を比較的少ないデータ量で正確に表現することができることや、経路計画手法で非常に大きな役割を担う干渉チェックが、近似セル分解によって表現され

た物体間では非常に容易である。

近似セル分解では、障害物を含む $N$ 次元環境を、 $2^N$ 個のセルに分割する。分割されたセルそれぞれに対して内外判定を行い、すべて自由空間の場合はWhiteセル、すべて障害物内の場合はBlackセル、自由空間と障害物が混ざりあっている場合にはGrayセルとラベル付けをする。Grayセルは更に $2^N$ 個のセルに分割する。この操作を、Grayセルが無くなるか、あらかじめ決めておいた分割荒さ $k$ まで達するまで再帰的に行う。最後まで残ったGrayセルはBlackセルに反転し、障害物を大きめに見積ることで経路の安全性を保証する。

近似セル分解によって表現された3次元環境と、搬送物および移動ロボットを図5(a)(b)に示す。

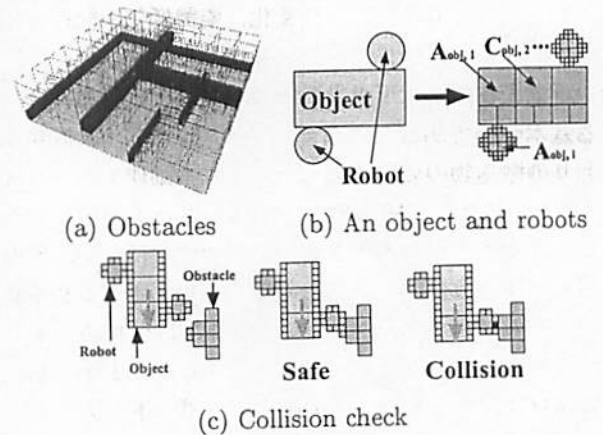


Fig. 5 Approximate cell decomposition

近似セル分解を用いることによって、すべての物体が同一の表現方法で記述可能である。そのため、近似セル分解によって表現された2つの物体の干渉チェックは、それぞれの近似セル分解のノードの重なりによって容易に検出できる(図5(c))。搬送物とロボットを構成する各セル $A_{obj,i}$ (図5(b))を、干渉チェックに用いると同時に、後述の経路探索時にポテンシャルが作用する制御点とすることで、自動的に制御点を生成することができる。

**3.3 探索空間の生成** 位置変化 $C_{pos}$ は、近似セル分解により離散化を行う。方向変化 $C_{ori}$ は、ロボットと搬送物の鉛直軸回りの回転姿勢を考え、離散化を行う。配置変化 $C_{rob}$ については、移動ロボットの配置の違いにより離散化を行う。姿勢変化 $C_{face}$ については、搬送物の安定搬送状態は搬送物の一面が床面に接した状態であるため、これを離散化する。

以上で生成したノードとそれらの隣接関係によって、探索空間を構築することができる。離散化された探索空間を図6に示す。

探索空間は、位置変化（並進自由空間内での自由度） $C_{pos}$ 、方向変化（ロボットと搬送物の  $z$  軸回りの回転の自由度） $C_{ori}$ 、配置変化（ロボット配置の自由度） $C_{rob}$ 、姿勢変化（搬送物の底面となる面の自由度） $C_{face}$  によって構成されている。 $C_{ori}$ 、 $C_{rob}$ 、 $C_{face}$  によって一意に定められる搬送形態が、それぞれ位置変化の自由度として1つ並進自由空間セルグラフを持つ。

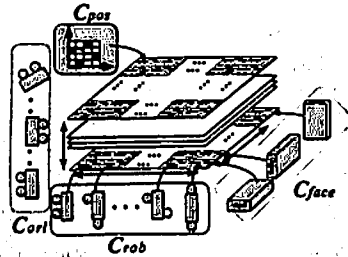


Fig. 6 Reconstructed C-space

並進自由空間セルグラフを部分探索空間と考えると、図6に示す探索空間は、搬送形態の数の部分探索空間群によって構成されていると考えることができる。図7に示すように、搬送経路はこの探索空間の探索を行うことによって生成される。経路は、部分探索空間内の並進移動と、部分探索空間間の遷移によって構成される。

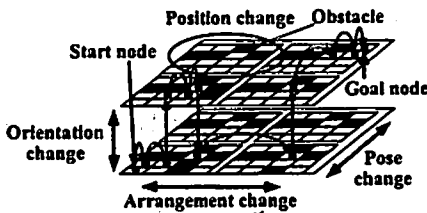


Fig. 7 Nodes and arcs in the reconstructed C-space

#### 4. 経路探索手法

4.1 探索手法  $A^*$  を探索手法として用い、構築したノードとアークにより構成される探索空間において探索を行う。 $A^*$  はヒューリスティック探索の1つで、与えられた評価関数に対して完全かつ最適の解を高速に見出すことができる。ここで探索とは、スタートからゴール地点までをつなぐノード列を探し出すことである。本論文では、ノード  $n$  における評価関数を式(1)で定義する。

$$f(n) = w_g \sum_{i=n_s}^n g(i) + w_h \sum_{i=n}^{n_g} h(i) \quad (1)$$

ここで、 $n_s$ 、 $n_g$  はスタート・ゴールノードを示し、右辺第1項は  $n_s$  から  $n$  までの経路コストを、右辺第2項は  $n$  から  $n_g$  までの見積りコストを示す。

さらに、コストとヒューリスティックの割合を変化させることによって、探索の性能を調節するために、コスト関数に対する重み定数  $w_g$  とヒューリスティック関数に対する重み定数  $w_h$  を設定した。特に  $w_h = 0$  としたとき、この探索はヒューリスティックを用いない Dijkstra 探索となる。

$w_g$  は0または1であり、経路コスト最適解を求める場合には  $w_g = 1$ 、経路の最適性は犠牲にできるだけ早く探索を行う場合には  $w_g = 0$  と設定する。

4.2 評価関数の設計 経路の最適性として最も一般的に用いられる指標は経路最短である。本論文では搬送物の3次元姿勢操作も行うため、例えば搬送物の姿勢を  $10[\text{deg}]$  変化させる操作と、 $0.1[\text{m}]$  だけ搬送する作業が存在し、単位系が異なるため、直接どちらが最適な作業か比較できない。そこで本論文では、経路の最適性の評価指標として搬送を実現する際に必要な時間を用いる。

また、移動ロボットに対する経路計画では、障害物からの距離を経路の最適性の指標にとることが多い。時間や距離だけを最適性の指標として求めた最適経路は、多くの場合、障害物のすぐ近くを通る経路となる。運動精度が高いマニピュレータの場合には問題とならないが、運動誤差が大きい移動ロボットは目標経路から外れる危険性が十分考えられる。そこで本論文では、 $A^*$  探索における経路コスト  $g(n)$  として、ノード  $n$  に至る経路を実現するのに必要な時間  $g_{time}(n)$  に、障害物からの距離の影響  $g_{danger}(n)$  を加えた式(2)を用いる<sup>(12)</sup>。 $g_{time}(n)$  は、各基本動作に必要な作業時間（位置変化  $g_{pos}$ 、方向変化  $g_{ori}$ 、配置変化  $g_{rob}$ 、姿勢変化  $g_{face}$ ）の和で表される。また、 $w_d$  ( $w_d > 0$ ) は障害物からの距離の影響の重みを決定する係数である。

$$\begin{aligned} g(n) &= g_{time}(n) + w_d g_{danger}(n) \\ &= g_{pos}(n) + g_{ori}(n) + g_{rob}(n) + g_{face}(n) \\ &\quad + w_d g_{danger}(n) \end{aligned} \quad (2)$$

ヒューリスティック関数  $h(n)$  は、ノード  $n$  からゴール  $n_g$  に至るために必要な時間の見積もりと危険度の見積もりの和として式(3)で表される。式(2)については4.3節、式(3)については4.4節で説明する。

$$\begin{aligned} h(n) &= h_{pos}(n) + h_{ori}(n) + h_{rob}(n) + h_{face}(n) \\ &\quad + h_{danger}(n) \end{aligned} \quad (3)$$

4.3 コスト関数の設計 スタートから現在のノードまでのコストを表すコスト関数のうち、位置変化、方向変化、配置変化に必要な時間  $g_{pos}$ 、 $g_{ori}$ 、 $g_{rob}$  は、ロボットの移動速度により作業に必要な時間を計算し

て算出する。姿勢変化コスト  $g_{face}$  は、局所的な問題解決のための Local expert として使用する局所的物体操作計画器によって求められる操作時間を用いる。

障害物までの距離の影響コスト  $g_{danger}$  は、ロボットと搬送物から障害物までの距離によって求める。ロボットと搬送物から最も近い障害物までの距離を  $d$  とすると、 $g_{danger}$  は式 (4) で表される。

$$g_{danger}(n) = \frac{1}{d} \quad (4)$$

4.4 ヒューリスティクス関数の設計 現在のノードからゴールノードまでのコストを見積もるヒューリスティクス関数のうち、方向変化、配置変化、姿勢変化に必要な時間の見積もり  $h_{ori}$ ,  $h_{rob}$ ,  $h_{face}$  に関しては、現在の状態と目的の状態を比較し、ゴールまでの遷移に最低限必要なコストとして評価する。

位置変化の見積もり  $h_{pos}$  については、障害物などの影響によりゴールまでの直線距離をそのまま用いると障害物の凹部分に簡単にはまってしまうことなど、探索性能が悪くなることが予想される。そこで、 $h_{pos}$  及び  $h_{danger}$  については、ポテンシャル関数を用いる。

環境内のある点  $x$  に生成されるポテンシャル場  $P(x)$  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  $P_{rep}(x)$  と、ゴールへの引力を表すポテンシャル  $P_{att}(x)$  の和により次式で表される。

$$P(n) = P_{att}(n) + P_{rep}(n) \quad (5)$$

ここで、ポテンシャル場  $P$  は図 5(b) における搬送物とロボットのすべての制御点  $A_{obj,i}$  ( $i = 1, \dots, c$ ) に作用するため、次式となる。

$$h_{pos}(n) + h_{danger}(n) = \sum_{i=1}^c P(A_{obj,i}(n)) \quad (6)$$

ポテンシャルとしては、(A) Euclid ポテンシャル、(B) Wavefront ポテンシャル、(C) Skeleton Wavefront ポテンシャルを用いて比較を行う (図 8)。Euclid ポテンシャル関数は、障害物からの距離に応じた斥力<sup>(13)</sup>と、ゴールからのユークリッド距離に応じて決定される最も単純な引力の和で表される。Wavefront ポテンシャルは、ゴール地点に生じた波面を広げて形成する。Skeleton Wavefront ポテンシャルでは、Skeleton<sup>(3)</sup>上に Wavefront 法を適用することにより、障害物からの距離を取りつつゴールに向かうポテンシャル場が生成可能である<sup>(8)</sup>。

4.5 許容的ヒューリスティクス  $A^*$  探索では、ヒューリスティックが許容的であれば、完全かつ最適であることが保証されている。許容的ヒューリスティックとは、実際のコストを決して超えない見積りになる

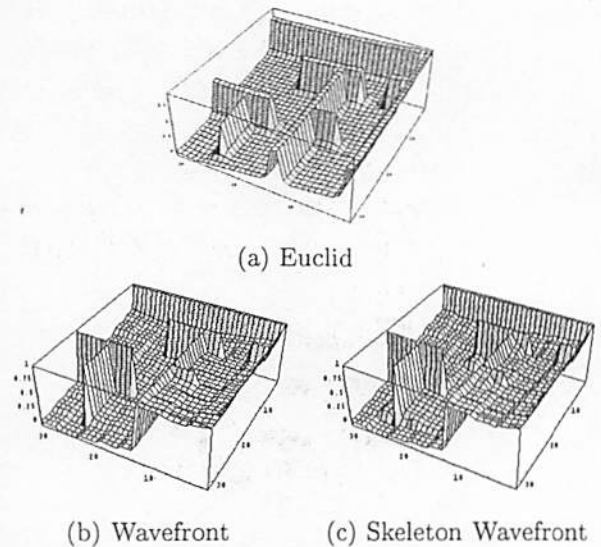


Fig. 8 Three potential fields

ようなヒューリスティックである。本論文で構築した探索空間は、ノード間に操作コストとして時間を考慮したことで、探索空間が単純な距離空間から歪んだ空間になっており、ヒューリスティックは許容的でない場合が生じる。そこで、経路最大の式 (7) を用いることにより、この問題を解決する<sup>(9)</sup>。ただし、 $n$  は現在のノード、 $n'$  は子ノードである。

$$f(n') = \max(f(n), g(n') + h(n')) \quad (7)$$

$A^*$  探索によって式 (7) を最小とする最適値が求められる。求められる解は、作業時間に必要な時間が短く、障害物からの距離をとった経路となる。

## 5. シミュレーション

5.1 動作計画結果 障害物が 10 個以上存在する環境において、2 台の移動ロボットにより L 字型の対象物を搬送するための動作を計画した。すべてのシミュレーションにおいて  $w_d = 1$  と設定した。 $w_g = 1$ ,  $w_h = 1$ , ゴール位置を図 9 中 Goal 4 に設定し、Skeleton Wavefront ポテンシャルを用いた際に計画された経路を図 9 に示す。図 9 中の a~j は、図 10(a)~(j) に対応する。ある程度の幅の狭い場所を通過する際 (a → c, c → d, f → g など) には、水平面内での搬送物の姿勢を変化させたり、ロボットが搬送物を把持する位置を変化させることで障害物を回避し柔軟に搬送を行っている。また、非常に狭い場所を通過する際 (h → j など) には、広い場所で予め物体操作を行い搬送物の姿勢を変化させてから (g → h) 通り抜ける動作が生成されている。以上、方向変化・配置変化・姿勢変化を適宜行い、スタートからゴール地点まで障害物と衝突することなく物体を搬送する経路

を求めることができた。

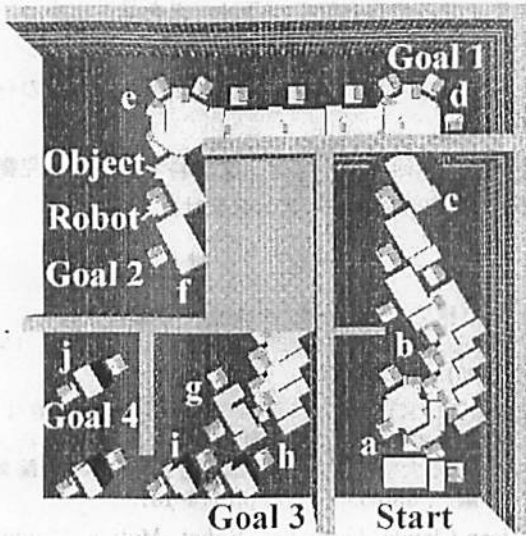


Fig. 9 Result of motion planning I

5.2 ポテンシャルの比較  $w_g = 1, w_h = 1$  とパラメータを固定し、問題の難しさを変化させた際の各ポテンシャルの性能を比較した結果を表1に示す。表1では、Euclidポテンシャルを用いてゴール1までの経路を探索した展開ノード数  $N_{open}$  を1とし、条件を変動させたときの展開ノード数の比を示した。展開ノード数が少ないほど、探索の性能は良い。問題の難しさは、図9においてゴールが1から4になるにつれ難しくなる。

問題が簡単な場合には、各ポテンシャルの間に性能差はほとんどないが、問題が複雑になるにつれEuclidポテンシャルとそれ以外の差が大きくなった。これは、Euclidポテンシャルは、計算量も少なくゴールへの収束性も良いため、比較的単純な環境形状の問題に対しては良い結果を示すが、環境内に凹形状などの複雑な形状が存在する場合には、多くのローカルミニマが発生することにより探索の停留やバックトラックをひき起こし、探索の効率が著しく悪化することが原因であると考えられる。

WavefrontポテンシャルとSkeleton Wavefrontポテンシャルを比較すると、展開ノード数は後者が平均的に10%程度少ない。Wavefrontポテンシャルは、ゴールからの大まかな経路長を反映することができ、制御点が1個の場合ローカルミニマが存在しないナビゲーション関数<sup>(3)</sup>となるが、障害物の非常に近くを通る経路を算出するため、障害物近くにおいてOctreeで細かい表現されたセルを無意味に探索する可能性がある。シミュレーション結果により、Skeleton上にWavefront法を適用して障害物からの距離を取りつつ

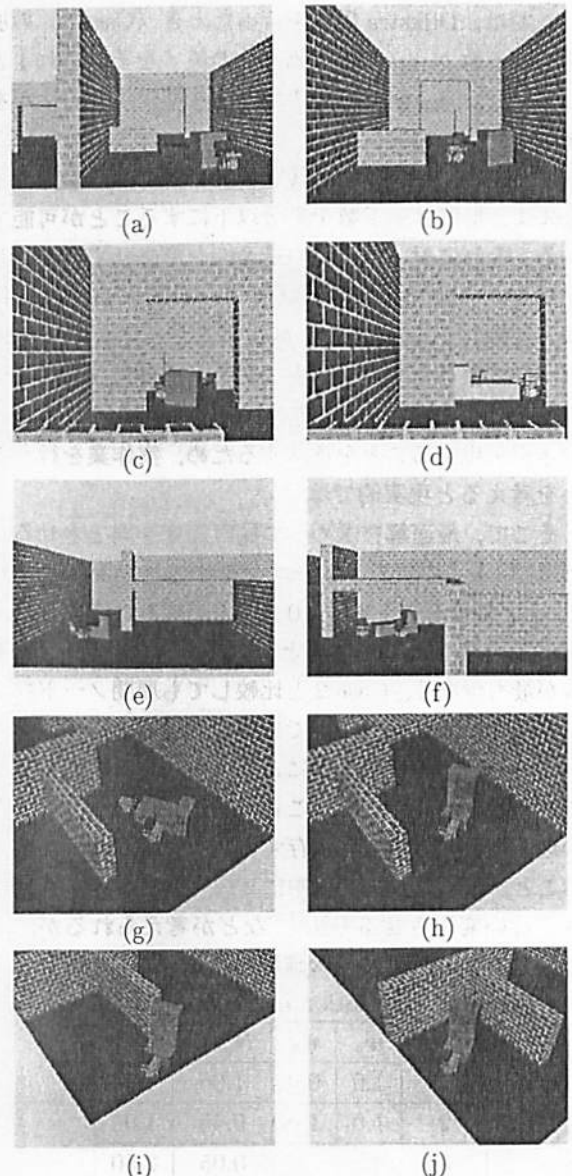


Fig. 10 Result of motion planning II

ゴールに向かうように設計したSkeleton Wavefrontポテンシャルを用いることにより、細かいセルの探索を抑えることができることが分かった。よって、Skeleton Wavefrontポテンシャルを用いることにより、複雑な環境でも効率的に探索できることが示された。

Table 1  $N_{open}$  value of three potential fields

Potential	Goal 1	Goal 2	Goal 3	Goal 4
(A) Euclid	1.00	1.36	2.96	4.09
(B) Wavefront	0.90	1.53	2.32	3.21
(C) Skeleton Wavefront	0.83	1.37	2.16	3.06

5.3 重み係数の比較 Skeleton Wavefrontポテンシャルを用い、ゴール位置をGoal 4と固定した際に、探索時の重み係数を変化させた結果を表2に示す。

ここでは、Dijkstra 探索を行ったとき (Case 1) の展開ノード数  $N_{node}$  と、評価関数の値  $f$  をそれぞれ 1 とし、 $w_g$ ,  $w_h$  を変動させた場合の探索手法の性能を比較した。

A\* 探索を行った場合 (Case 2), 解の最適性を保ったまま、展開ノード数を半分以下にすることが可能である。それに対して、解の最適性を考慮せずに探索した場合 (Case 3) には、展開ノード数を Dijkstra 探索と比較して 5% 程度まで減らすことが可能であるが、ゴールに至るためのコストである評価関数  $f$  は 2.5 倍となった。このことは、非常に複雑な操作を行いつつ搬送を実現することを意味するため、実作業を行うことを考えると現実的ではない。

そこで、最適解を求めつつ探索速度を向上させるためには、 $w_h$  の値をチューニングすることが考えられる。 $w_h$  の値を 0.0 から 1.0 まで 0.1 刻みに変化させて調べた結果、 $w_h = 0.5$  のとき (Case 4), 展開ノード数が最も少なく、Case 2 と比較しても展開ノード数を 60% 程度に減らすことができた。よって、パラメータチューニングを行うことにより、更に探索性能を向上させることが可能であることが分かった。パラメータの最適値は作業環境に依存するため、探索前に決定することが難しい。探索途中にヒューリスティクスの評価を行い変化させる方法<sup>(14)</sup>などが考えられるが、設計指針については今後の課題である。

Table 2 Condition of parameters  $w_g$ ,  $w_h$

Case	$w_g$	$w_h$	$N_{open}$	$f$
1	1.0	0.0	1.00	1.00
2	1.0	1.0	0.45	1.00
3	0.0	1.0	0.05	2.50
4	1.0	0.5	0.27	1.00

5.4 計算時間 Skeleton Wavefront ポテンシャルを用い、Goal 4 に至る経路を求める問題で、環境全体の広さ 12.8[m] × 12.8[m] × 12.8[m] に対して 0.1[m] の分解能で計画を行った結果、334MHz の Ultra Sparc II を用いて計算時間は約 3000CPU 秒であった。よって、十分に細かい分解能において、現実的な時間で解を算出可能であることが示された。

## 6. 結 論

本論文では、3次元複雑環境における複数移動ロボットによる物体搬送のための経路計画手法を提案した。

本論文で取り扱った問題は、高次元の計画問題であり、移動ロボット群が搬送物を操作するという拘束条件のもとで最適解を求める必要がある。そこで、探索空間の次元を縮退し、離散化することで効率的な探索

空間の構成を行った。また、A\* 探索において、ヒューリスティクスや探索時のパラメータを最適化することにより、高速に最適解を求めることができた。シミュレーションにより、本論文で提案した計画手法の有用性を示した。

謝 辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究 (C)12650243 の補助を受けた。

## 文 献

- (1) 橋本 雅文, 大場 史憲, 江口 透, “複数の移動ロボットによる動的搬送制御法”, 日本ロボット学会誌, 13-6, (1995) pp.886-893.
- (2) 太田 順, 宮田 なつき, 新井 民夫, 吉田 英一, 倉林 大輔, 佐々木 順, “持ち替え動作を導入した移動ロボット群による大型対象物の搬送制御”, 日本機械学会論文集 (C編), 63-605, (1997) pp.174-181.
- (3) Jean-Claude Latombe, *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, (1991).
- (4) Yong K. Hwang, “Gross Motion Planning-A Survey”, *ACM Computing Surveys*, 24-3, (1992) pp.219-291.
- (5) Kamel Gupta and Angel P. Del Pobil Eds, *Practical Motion Planning in Robotics*, John Wiley & Sons, (1998).
- (6) 北村 善文, 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探索”, 日本ロボット学会誌, 14-8, (1996) pp.1186-1193.
- (7) Lydia E. Kavraki, Petr Svestka, Jean-Claude Latombe and Mark H. Overmars, “Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12-4, (1996) pp.566-580.
- (8) Jerome Barraquand and Jean-Claude Latombe, “Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach”, *The International Journal of Robotics Research*, 10-6, (1991) pp.628-649.
- (9) Stuart Russell and Peter Norvig (古川 廉一 訳), “エージェントアプローチ人工知能”, 共立出版, (1997).
- (10) Chee-Keng Yap, “How to Move a Chair Through a Door”, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3-3, (1987) pp.172-181.
- (11) 山下 淳, 太田 順, 河野 功, 福地 正樹, 新井 民夫, 淺間 一, “複数移動ロボットによる協調物体操作計画”, 電気学会論文誌 C, 121-C-3, (2001) pp.549-556.
- (12) Subbarao Kambhampati and Larry S. Davis, “Multiresolution Path Planning for Mobile Robots”, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, RA-2-3, (1986) pp.135-145.
- (13) Yong K. Hwang and Narendra Ahuja, “A Potential Field Approach to Path Planning”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8-1, (1992) pp.23-32.
- (14) Koichi Kondo, “Motion Planning with Six Degrees of Freedom by Multistrategic Bidirectional Heuristic Free-Space Enumeration”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7-3, (1991) pp.267-277.