3次元平行移動物体のための障害物回避経路の高速計画法*

柴田 昌明** 村上 俊之*** 大西 公平†

Fast Collision-Free Path Planning for Translating Mobiler in Three-Dimensional Space

Masaaki Shibata, Toshiyuki Murakami and Kouhei Ohnishi

This paper describes a novel method of planning collision-free path for a translating mobiler in three-dimensional workspace. The safe path is found in short calculation time by the proposed method, so that it is feasible to be applied for real-time processing. Especially, in case there exist a lot of complicated obstacles in the workspace, the advantages of the method appear more efficiently. In general collision-free path planning methods, Configuration Space is often applied. Utilization of the space is very effective to plan the safe path, but it requires so much calculation time. In this paper, in order to get the calculation time shorter, rectangular parallelepiped forbidden areas are introduced, instead of the general forbidden area in the configuration space. To apply the rectangular parallelepiped forbidden area makes the interference detection of the path against the forbidden area much easier and faster, and moreover, it makes the determination of the direction to which the path goes definite. The validity of the proposed method is confirmed in numerical experiments.

Key words : collision avoidance, rectangular parallelepiped forbidden area, configuration space, real-time processing, three-dimensional path planning

1. 緒 言

最近、柔軟な生産システムに関する研究が広く行われている¹⁾。特に、組立・分解作業においては、環境や作業の内容に応じて作業内容を修正してゆく自立組立ロボットの開発が目標としてある。

組立・分解作業における部品の移動は、製造物や環境との衝突を回避しなくてはならない。これまでの大量生産型の組立作業では、製造物の形状が確定しており、オフラインであらかじめ計画された経路に従って、部品を取付け部位へ安全に移動させることができる。一方、将来的な、個々の製品の形状がそれぞれ微妙に異なる多品種少量生産ラインでは、それぞれの部品のための非衝突経路を逐一計画する必要がある。同様に分解作業では、工作物の形状が、生産段階で用いられた情報(知識データベース)と異なっている可能性があることを考慮すれば、リアルタイムでの形状認識と同時に、経路を再計画する必要がある。このように動的なシステムでは、経路計画に即応性が要求される。

そこで本稿では、障害物回避を考慮した3次元経路の高速な計画方法を提案する。非衝突という点では、製造物に対するアクチュエータの衝突と、部品の衝突を考慮しなくてはならない。アクチュエータの衝突回避は非常に重要であり、多くの研究が為されている。しかし、取付け部位に最も接近するのは部品であり、また、適切な組立手順が得られる場合、アクチュエータの衝突よりも、むしろ部品の衝突の危険性が高いと思われる。このような観点から、部品の障害物回避を中心に考慮した安全な移動経路の生成を考える。そして、これをさらに一般化し、3次元空間において並進運動をする物体のための障害物回避経路の計画問題として考える。

1.1 これまでの経路計画問題

これまでの経路計画問題では、2次元作業空間を有する移動体についての研究が多く為されている。2次元問題では、特に、経路長が最短であるものを発見する方法について議論されることが多い。単純化された2次元最短経路問題は、グラフ検索問題として考えられるので、Dijkstraの方法²⁾などにより簡単に求められる。以後、グラフ検索方法の高速化が図られるなどして、非常に効率の良い手法が示されるに至った³⁾⁴⁾。さらに、障害物の占める領域の形状に関する制約の緩和を考慮した問題についての研究もある⁵⁾。

一方、3次元問題では、問題が複雑になり、2次元の場合のように考えることが容易でない。2次元問題の解法を、直接に3次元問題へ適用できる場合はまれである。Lozano-Pérezら⁶⁾による初期の経路計画問題では、凸多角形もしくは凸多面体である障害物について、拡大障害物を適用することで問題の単純化を図る方法(可視グラフ法)が示されている。この方法は、コンフィグレーション空間(以下C空間と呼ぶ)を生成・利用した手法として知られている。C空間の利用は、経路計画問題の単純化のために非常に有効な手段として広く用いられている。しかし、部品や環境が複雑な形状であって、それらを正確に認識し、経路を計画したい要求がある場合、時間的コストの観点からすれば、C空間の利用はあまり有利な手法とは言えない。

さらに、C空間が生成された後にも、経路探索のために多くの演算が必要となる。拡大障害物が多くの面を有し、それらの面が任意の形状である場合、経路との干渉判定に多くの時間を費やすことになる。このように、3次元問題は、任意の可能解を得ることすら容易ではなく、まして、最短経路問題に至っては、NP-hardであることが示されており⁷⁾、その求解には障害物数および拡大障害物の頂点数に関しての指数オーダの計算量が必要であることが予想されている⁸⁾。

提案する方法では、経路長の最適性を問わずに、演算量の

* 原稿受付 平成7年2月17日

** 学生会員 慶應義塾大学理工学部(横浜市港北区日吉3-14-1)

*** 慶應義塾大学理工学部

† 正会員 慶應義塾大学理工学部

低減による高速な求解を主眼に置いて経路計画を考えている。よって、計画される経路は最短ではないが、より適切な可能解を求めるとする。C空間で用いるような禁止領域の生成を極力おこなわず、これに代わる直方体禁止領域を導入し、経路を探索することで、記憶データの少量化、処理時間の短縮を図っている。

2. 3次元経路計画問題

前章でも触れたように、部品の移動に際して衝突を回避すべき障害物となるのは製造物である。その位置及び形状はセンサ等によってリアルタイムで認識されると仮定する。そして、これらの情報が取得され次第、移動経路の算出を実行する。

部品および製造物については任意の形状を許容する。そして、これらをすべて平面からなる多面体として表す。曲面部分は複数の平面を組み合わせることで表現するが、細かく数多くの平面を適用することで精度を確保する。本手法の計算時間オーダは、それらの多面体の面数にあまり依存しないので、多面体を複雑に表現する必要のある場合に、より効果を発揮する。

このように部品および環境をとらえることで、本問題は幾何モデルに基づく経路計画問題として扱うことができる。以下に、本稿にて述べる経路計画問題を明確化する。

3次元作業空間において、体積を有する移動体のための経路を計画する。移動体については、任意の方向への移動が可能であるとし、回転運動しないことを制約とする。移動体の初期状態における出発地点、および最終状態における目的地の2点が、作業空間内の任意の位置に指定される。回転運動についての制約から、移動体は目的地に到達するまで、初期状態における姿勢を保って平行移動を行うことになる。移動体は単体で移動するとし、これを支持するものなどは考慮しない。またその形状は、任意の凸多面体により表現され、変形をしない。

作業空間内に存在する障害物も体積を有し、任意の多面体によって表現されるとする。これらは、必ずしも凸である必要はない。しかし、任意の多面体は、複数の凸多面体を組み合わせたものとして認識できるので、実際は、凸多面体障害物のみを対象として考えればよいことになる。すべての障害物は、空間に固定されているとする。

3. 直方体禁止領域の導入

多数の障害物が作業空間内に存在する場合でも、すべての障害物を迂回する必要があるわけではない。不要な禁止領域の生成を省くことで、処理全体の高速化を図ることができる。そこで、禁止領域を表す拡大障害物に代わる直方体禁止領域を定義し、経路計画のためのプリプロセスにかかる時間コストの低減を図る。

3.1 コンフィグレーション空間

前章にて示した経路計画問題に、従来のC空間を適用した場合に生じる、高速処理には有利でない点について触れる。

移動体が回転運動をしないという制約から、C空間は作業空間と同次元の座標系を有する。このとき、空間内の禁止領域は、障害物ごとに求められる拡大障害物の占める領域として定義される。そして、移動体の位置はC空間内の一点と

Fig.1 6-Extremal points of mobiler

Fig.2 Rectangular parallelepiped forbidden area

して表現される。計画される経路は線分列によって表されるので、C空間の利用には、このように経路の計画が簡単化されるという利点がある。

ところが、拡大障害物の生成には、移動体の頂点と障害物の面、および移動体の面と障害物の頂点による接触面を計算する必要がある。したがって、それらが多くの面、頂点を有する場合、膨大な演算量を要し、ひいては処理時間に悪影響を及ぼす。そして、C空間全体を得るためには、すべての障害物について拡大障害物を生成することになる。

3.2 直方体禁止領域

拡大障害物を求める代わりに、これに外接する直方体領域を導入し、その定義および生成法について述べる。

まず、移動体の頂点について、‘東西南北上下’の6つの端点を見つける。図1に示すように、移動体の中心点を原点とする局所座標系を考えると、それらの端点を含み、それぞれx軸、y軸、z軸に直交する平面の各軸に対する交点を $\{d_x^+, 0, 0\}$, $\{0, d_y^+, 0\}$, $\{0, 0, d_z^+\}$, $\{d_x^-, 0, 0\}$, $\{0, d_y^-, 0\}$, $\{0, 0, d_z^-\}$ とする。元の障害物についても6つの端点を明らかにした上で、例えば、北側の端点から $|d_y^-|$ だけ北側に位置する点を含み、y軸に直交する平面 $y = y_i^+$ を考える。同様に、元の障害物から $|d_x^+|$ だけ離れた平面を6方向について求め、図2に示すような、これらの面からなる直方体領域を定義する。

以下、このような拡大障害物に外接する直方体を‘直方体禁止領域’と呼ぶことにする。この領域は、元の障害物に対する拡大禁止領域に外接している。しかし、6つの面の決定には、拡大障害物を明らかにする必要はなく、元の障害物の6つの端点の位置と、移動体の6つの端点の位置が得られれば、容易に求めることができる。

ここで、次章にて述べる経路計画のために、直方体禁止領域の6つの面について、位置に関するソートを実行し、ラベル付けをしておく。この操作は、計画される経路と禁止領域との干渉判定の際の時間コストの低減に有効となる。

4. 経路計画アルゴリズム

4.1 基本戦略

直方体禁止領域が求められた空間における3次元経路計画法の基本手順を示す。参照のために、図3に2次元モデルでの探索の様子を示す。

- Step 1. 経路端点の現在位置（初期地点）及び目的地の2点間を線分で結んだ経路を考える。
- Step 2. 線分経路と直方体禁止領域との干渉を判断する。現在位置に最寄りの干渉地点を発見し、この地点まで前進する。干渉が無い場合は終了。
- Step 3. 干渉した禁止領域に対する迂回経路を計画する。
- Step 4. 迂回経路に従って前進し、その禁止領域の表面を離脱可能な点まで到達する。この後、Step 1に戻り、以上の手順を繰り返す。

干渉判定では、経路端点の現在位置と目的地を対頂点とする直方体領域に掛かる直方体禁止領域を対象として限定する。直方体禁止領域を生成する過程で、各面が位置に関してソートされているので、 x, y, z 軸に沿って順次、効率よく判定してゆける。計画されてゆく経路の端点が、次第に目的地へと近づいて行くので、干渉判定の対象となる直方体禁止領域の数が徐々に減り、干渉判定の試行回数が減少してゆく。さらに、すべての面が長方形であることから、経路と面との干渉判定は非常に容易である。

また、3次元経路計画を難しくしている問題の一つが迂回経路の計画であるが、これについては次節にて述べる。

このように、前進・迂回を繰り返しながら経路が計画される。前進や迂回の各フェーズにおいては、局所的に最短経路計画を企図する手法を採用する。全体的に最短である経路は得られないが、比較的良好な経路が計画されることが期待できる。

4.2 迂回経路の計画

経路端が直方体禁止領域の表面上に到達した場合、その領域表面をたどり離脱まで至る迂回経路を計画する。3次元多面体の表面上の2点の最短経路計画については多くの研究があり、障害物の頂点数あるいは面数を M とした場合、計算

Fig.3 Path planning in 2-D workspace model

Fig.4 Nonahedron on which shortest path exists

オーダ $O(M^2 \log M)$ の手法などが示されている⁸⁾⁹⁾。また、障害物を1つに限った場合では $O(M^2 \log M)$ 、2つの場合では $O(M^3 \log M)$ のオーダで計画されることが示されている⁸⁾¹⁰⁾。

しかし、今、我々の扱う障害物は直方体であることから、より有利なオーダで解くことができる。図4は、経路端点が直方体禁止領域（色付き部分）の表面上の点Pに到達した状況を示す。経路が到達した直方体以外のすべての直方体禁止領域を無視して、この直方体の表面の一部と目的地を含む仮想面からなる仮想凸多面体（太線）を考える。図4の場合、直方体領域の3面と、目的地を含む6つの3角形で構成される9面体であるが、これ以外にも目的地の位置によって5種類の形状の多面体がある。経路端点と目的地を結ぶ最短経路は、その凸多面体の表面上に存在する。経路端点と目的地の位置関係から5つの仮想多面体のうち1つが直ちに選ばれる。いずれの仮想多面体についても、最短経路長を与える有効な経路のパターンは、あらかじめ想定が可能であり、各パターンにおける経路の算出は、単純な一次式から得られ、候補となる経路の経路長は容易に算出される。その経路パターンの数は、最も多い仮想多面体の場合でも20とおりが存在する。つまり、最悪の場合でも20の経路の経路長を比較することにより最適解が得られる。したがって、計算オーダは $O(1)$ である。

ただし、このようにして求められる経路は、仮想多面体に内包されている直方体以外の直方体禁止領域を無視して計画されている。実際には、直方体領域が重なり合った状況を考慮する必要から、直ちにそれを安全な経路であると断定できない。したがって、他の直方体領域との干渉判定を行いながら経路をたどって行き、干渉が発生するまで、計画された経路に沿って前進して行くとする。

4.3 重なり合う直方体禁止領域

複数の直方体領域が重なり合っている箇所では、図5に示すような凹稜 (Concave Edge)、凹頂点 (Concave Vertex)、鞍頂点 (Saddle Vertex) などが存在するため、探索される経路が目的地へ向かって一様に接近することはできない。

図6に示すように、経路が1つの直方体領域の表面上の点Pに到達した場合、前節にて述べた方法によって、その表面上をたどる迂回経路を計画し、それに従って前進する。ここで、2つ目の直方体禁止領域に点Qで衝突したと仮定する。

Fig.5 Terms of parts of rectangular parallelepiped

Fig.6 Detouring path along concave edge

次に、点 Q が存在する凹稜に沿った2方向のうち、いずれかの方向を選択し、前進する。

Case 1. 2点とも鞍頂点の場合 → 目的地点に近い方を選択

Case 2. 鞍頂点と凹頂点の場合 → 鞍頂点を選択

Case 3. 2点とも凹頂点の場合 → 目的地点に近い方を選択

鞍頂点に至った場合、再び、前節で述べた方法を適用し、直方体禁止領域の表面をたどる迂回経路を計画する。また、凹頂点に到達した場合には、たどってきた凹稜以外の2つの凹稜の一方を選択し、これに沿って前進する。この選択は上記の方法に準ずる。

すべての移動に際し、到着した地点が、過去に到着したことがあるかどうかを判断する。既に通過していた場所であった場合はバックトラックし、それまでに分岐があったところまで後退して、試行していない方向に前進する。これにより、すべての可能性のある経路が試行され、また、無限ループが回避される。もし、目的地点が複数の直方体禁止領域によって完全に取り巻かれている状態になれば、可能解が実在し、目的地点へ向かう経路は必ず発見される。

しかしながら、目的地点が直方体禁止領域の内部に含まれてしまっている場合、あるいは複数の直方体禁止領域によって取り囲まれている場合、目的地点への到達は不可能となる。そこで、直方体禁止領域の一部を拡大障害物に置き換えるための「切削」を行う。

4.4 直方体禁止領域の切削

直方体禁止領域の一部を、内包されている拡大障害物の面に沿って切削し、部分的に正味の禁止領域を求める作業を「直方体禁止領域の切削」と呼ぶことにする。もし、直方体領域の全部を切削すれば、内包される拡大障害物を求めることと同義になる。本手法では、必要な個所のみを切削することで、切削に要する計算時間の低減と、経路計画時の衝突判定の試行回数の増加の抑制を図る。

まず、切削の具体的な方法を述べる。図7に、経路端点が凹稜上に到達した状況を上から見た様子を表す。はじめに、点 Q を含む直方体禁止領域の面は、頂点 A および頂点 B を参照して決定されている。それらの頂点と移動体の面とが接した状態で作る平面で直方体領域を切削する。次に、 A 、 B を含む Q の方向に向いた面と、移動体の頂点の為す平面で切削する。移動体の頂点数 K 、面数 $O(K)$ 、障害物の最大

Fig.7 Cut-off of overlapped forbidden area (Top view)

Fig.8 Detouring path on cut-off surface

Proposed Method		Mobiler's			Obstacles'		
		Vertices	Edges	Planes	Vertices	Edges	Planes
	●	20	40	12	12	40	18
	■	20	40	12	5	9	6
	◆	5	9	6	12	40	18
	▲	5	9	6	5	9	6
Only for Generating C-Space	○	20	40	12	12	40	18
	□	20	40	12	5	9	6
	◇	5	9	6	12	40	18
	△	5	9	6	5	9	6

Fig.9 Simulation results

頂点数 M 、面数 $O(M)$ を用いて、切削に費やす計算時間のオーダーは $O(KM)$ となる。

切削された後の禁止領域を迂回する方法を示す。基本的な戦略は、これまでに示した手法と同様だが、切削された禁止領域の形状は任意の凸多面体であるため、効率の悪い方法となる。

図8に示すように、切削面上に到達した場合(点 a)、まず、到達した面以外のすべての禁止領域を無視した最短経路計画を行う。図中では、経路 $a-b-T$ が最短経路である。この経路に沿って、点 b まで前進する。次に、点 b から T へ至る最短経路を計画する。これにより、経路 $b-c-T$ が得られる。同様にして、点 c まで前進し、禁止領域表面を離脱する。

このように直方体禁止領域の切削によって、可能解が発見不能になる事態が回避される。

5. シミュレーション

提案されたアルゴリズムに基づいて計算機シミュレーションを行った。シミュレーションには、Workstation SUN SPARC Classic を用いた。また、以下に示される計算時間には、ハードディスク等の外部記憶装置へのアクセス時間を含んでいない。

作業空間の状況として、移動体の(頂点数、稜数、面数)は、(5, 9, 6)および(20, 40, 12)の2通り、また、障害物は(5, 9, 6)および(12, 40, 18)の2通りを用い、都合4通りの組合せについて実行した。それぞれの場合について、20, 50, 100, 200, 500, 1000個の障害物を設定しており、個々の障害物の形状・大きさはすべてランダムに与えてある。示された結果は、100回試行の平均値を採用している。

5.1 結果

図9は、障害物数に対する経路計画に要した計算時間の

Table 1 Shared time for path planning per total time

Mobiler's			Obstacles'			
V	E	P	V	E	P	
20	40	12	12	40	18	6.2 - 15.1 %
20	40	12	5	9	6	9.3 - 24.7 %
5	9	6	12	40	18	5.3 - 28.4 %
5	9	6	5	9	6	6.6 - 21.7 %

結果を表す (●■◆▲). 計算時間とは、直方体領域の生成と経路の計画に要した時間を意味する。さらに、図9には、C空間を生成した場合に要する計算時間を比較・対照のためにあわせて示してある (○□◇△). これには、経路計画の時間を含んでいない。

また、表1は、計算時間全体における経路探索に費やした時間の比率を表す。

5.2 検討

C空間の生成は、1つの障害物につき、4.4節にて示した直方体領域の切削と同様の計算量が必要となる。移動体の頂点数 K 、障害物の頂点数 M 、障害物数 N 、 $L = NM$ として、計算オーダは $O(KL)$ となる。結果からも線形性が見える。接触判定を迅速に行うためには、禁止領域の面についての位置や領域の情報などを保持しておくために、元の障害物についての情報 $O(L)$ の2倍以上の記憶容量を必要とする。そして、これらの情報を用いて接触判定が行われることから、経路計画の時間コストを増大させる原因にもなる。

他方、直方体禁止領域の生成に要する計算オーダは、作業空間内の障害物の総頂点数 L に依存する。6つの端点を発見するために $6L$ 回の比較を行うため、 $O(L)$ となる。また、これとは別に、面検索のためのソートに $O(L \log L)$ を費やす。しかし、シミュレーション結果から、この程度の障害物数では、面検索のためのソートによる時間への影響は無いことがわかる。また、保持すべき情報は、元の障害物の位置および直方体領域の6面の位置であり、6面の情報は、1つの直方体禁止領域あたり、6つの値 $\{x_i^+, y_i^+, z_i^+, x_i^-, y_i^-, z_i^-\}$ である。元の障害物のために $O(L)$ 、直方体禁止領域のために $O(N)$ の記憶容量を使用する。切削の行われていないところでは、この6つの値のみを用いて接触判定をするので、経路計画の際の時間短縮に効果を上げていると思われる。

結果に示される時間のみを単純比較すれば、10～100倍の高速化が得られていることがわかる。しかしながら、本手法は経路計画までを含めて、有効性が評価されるべきなので、経路計画についての検討を同時に考慮しなくてはならない。C空間を用いて経路を計画する何らかの手法と比較したとすれば、それ以上の高速化が図られていると言える。

表1は、各条件の下、処理時間全体に対する経路探索に費やした時間の比率を示す。経路計画の計算オーダは、経路端

が直方体禁止領域と干渉した回数、および凹頂点や鞍頂点で生じる経路探索のための分岐の回数に依存する。各分岐においては、2方向が選択されるので、分岐回数を R とするとき、 2^R とおりの経路が候補として存在することになる。よって、経路計画の計算オーダは R に関して指数的となることが予想されるが、表1を参照すれば、経路計画が短時間で行われていることがわかる。

6. 結 言

与えられた環境情報の幾何モデルに基づいて3次元非衝突経路を高速に計画する手法を示した。本手法は、直方体禁止領域を導入することで、以下に挙げる高速化のための効果を得た。

- (1) 正味の禁止領域を求めるための計算時間および使用する記憶容量に比較して、低コスト化が図られた。
- (2) 干渉判定において、対象となる面が長方形であることから判定方法が非常に簡単であり、また、ソートできることから必要な判定のみを実行することが可能である。
- (3) 迂回すべき領域が直方体であることを利用した局所的な最短経路の計画法が適用でき、あらかじめ想定された候補経路の中から選択されうる。さらに、それら候補経路の経路長は、単純な1次式によって与えられるので、直ちに最短解が得られる。

シミュレーションにおける障害物の数やそれらの形状については、実用を念頭に置いた適切な条件を用いており、その結果より、提案された手法が本稿の冒頭にて述べたようなリアルタイム処理に十分対応しうることを示された。

参 考 文 献

- 1) “特集・知的生産システム”，電気学会誌，114，12，(1994) 785.
- 2) E.W. Dijkstra : A Note on Two Problems in Connection with Graphs, Numer. Math., 1, (1959) 269.
- 3) E. Welzl : Constructing the Visibility Graph for n Line Segments in $O(n^2)$ Time, Inform. Proces. Lett., 20, (1985) 167.
- 4) M. Fredman and R.Tarjan : Fibonacci Heaps and their Uses in Improved Network Optimization Algorithms, J. ACM, 34, 3, (1987) 596.
- 5) 劉雲輝, 有本卓 : 一般の形状の障害物が存在する環境における移動ロボットの経路計画法, 日本ロボット学会誌, 9, 2, (1991) 184.
- 6) T. Lozano-Pérez and M.A. Wesley : An Algorithm for Planning Collision-Free Paths among Polyhedral Obstacles, Comm. ACM, 22, 10, (1979) 560.
- 7) J. Canny and J. Reif : New Lower Bound Techniques for Robot Motion Planning Problems, Proc. 28th FOCS, (1987) 49.
- 8) M. Sharir and A. Schorr : On Shortest Paths in Polyhedral Spaces, SIAM J. Comput., 15, 1, (1986) 193.
- 9) J.S.B. Mitchell, D.M. Mount and C.H. Papadimitriou : The Discrete Geodesic Problem, SIAM J. Comput., 16, 4, (1987) 647.
- 10) M. Sharir : On Shortest Paths amidst Convex Polyhedra, SIAM J. Comput., 16, 3, (1987) 561.