学術論文

障害物境界のトポロジーに基づく 未知空間における移動ロボットの経路計画

楊 向東* 山本元司* 毛利 彰*

Path Planning for Mobile Robot in Uncertain Workspace Using Obstacle Topology

Xiang Dong Yang*, Motoji Yamamoto* and Akira Mohri*

The problem of path planning is studied for the case of a mobile robot moving in the environment filled with obstacles whose shapes and positions are not known. The robot is assumed to know its own and the target's positions and to have a sensory feedback which provides it with local information on its environment. An aggressive algorithm is proposed using the space topology and convergence and target reachability of the algorithm are explained. Advantages of the algorithm are shown as compared with a number of existing algorithms. Finally, simulation results show effectiveness of the proposed algorithm.

Key Words: Mobile Robot, Collision-Free, Sensor-Based Path Planning, Uncertain Workspace

1. ま え が き

衝突回避経路計画はロボット工学の一つの重要な問題である。この問題は基礎的なモデルにより二つの種類に分けられる。一つは、作業環境に関するすべての情報を予め与えるものである。このような問題は Model-Based Approach または Piano Mover's Model と呼ばれ[1]，“考えた後で実行する” (Act-After-Thinking) ような計画法である。もう一つは、本論文で検討する問題であり、作業環境に関する情報が未知（少なくとも部分的に未知）なものである。このような問題はセンサベーストパスプランニング (Sensor-Based Path Planning) または South Pole Search Problem[2] と呼ばれ，“考えながら実行する” (Act-While-Thinking) ような計画法である。センサベーストパスプランニングという問題は、ロボットのセンサからのオンラインの情報により周囲の局所環境を認識し、目標に到達できる衝突回避経路を探索するものである。したがって、各ステップの計算量とメモリの要求は少なくなっているが、経路の最適性ということに関しては何ら情報はなく、またアルゴリズムの収束性が主な問題となる。

センサベーストパスプランニングでは、二次元の未知環境における点ロボットの衝突回避経路計画という問題がまず注目されている。本論文ではこの問題について検討する。これまでに

提案されているいくつかのアルゴリズムはほとんどある直線と有限な障害物の境界に沿って経路を探索するものである。

Lumelsky らは上述の問題を触覚センサに基づいてモデル化し、控え目な (conservative) アルゴリズム Bug 1 と積極的な (aggressive) アルゴリズム Bug 2 を提案している[3][4]。Bug 1 は目標へ動く経路で遭った障害物の全体の境界を辿って目標に一番近い点を探し、その点を離脱点 (leave point) として目標に単調に接近する衝突点 (hit point) と離脱点の系列により目標に到達するものである。そして経路計画の時に現時点での目標への方向と目標までの距離さえわかれば現在の位置は知らなくてもよいという特徴がある[3]。Bug 2 は出発点と目標点をつなぐ直線 (M-line) と各障害物境界との交点により目標に単調に接近する衝突点と離脱点の系列を作り目標に到達する経路を計画する。また、Lumelsky らは非触覚センサ情報に基づく二つのアルゴリズムを提案し、局所センサ情報しか用いない場合にはいくら良いアルゴリズムでも得られる経路の性質の改善には上限があることを明らかにしている[5]。

さらに、Lumelsky は数学の迷路探索 (Maze-Searching) とセンサベーストパスプランニングのアルゴリズムの経路長さの特徴を比べて次の結論を得ている[6]。

(1) 数学の迷路探索アルゴリズムは単にグラフ理論 (Graph Theory) の研究に基づき、迷路のトポロジーを無視している。したがって、いくつかのアルゴリズムの経路長さの上限は Bug 1 より長い。

(2) アルゴリズム Bug 1 と Bug 2 はモデルのトポロジー

原稿受付 1994年5月13日

*九州大学工学部

*Faculty of Engineering, Kyushu University

に基づくものである。最もひどい場合の経路の長さを比較すると、いままでのアルゴリズムでは Bug 1 は一番短いものである。しかし、多くの場合(最もひどい場合でなく) Bug 2 の経路の長さは Bug 1 よりずっと短い。

Lumelsky らの検討に基づき、作業環境のトポロジーを調べ一般の場合に対して短い経路を計画するアルゴリズムを提案することは衝突回避経路計画の重要な課題になっている。また、実用的なアルゴリズムという点に関しては、センサとメモリに対する要求を少なくすることが必要である。それと同時に、以下の二つの問題を考えなければならない。

(1) アルゴリズムの収束性: アルゴリズムは有限な時間内に以下の二つの状態で計算を終了する。(a) 出発位置と目標位置をつなぐ経路が得られた。(b) 目標位置には到達できないという結論が得られた。

(2) 目標位置の到達可能性: 出発位置と目標位置をつなぐ経路が存在する場合には、必ずそれを見い出せる。

これまでに上述の経路計画問題に対して Lumelsky の他にいくつかのアルゴリズムが提案されている。登尾らは作業環境のトポロジーに基づき、有限環境(Lumelsky のモデルでは作業環境が無限)に関するいくつかのアルゴリズムを提案している[7]~[9]。これらのアルゴリズムはロボットのセンサとメモリの種々の異なった要求に対応しており、ある種類の環境に対しては良い経路が得られるものである。

上述のアルゴリズムはロボットを点としてモデル化するものである。登尾ら[10]や楊ら[11]は実際のロボットの大きさを考えて、ロボットを円とするモデルに基づくアルゴリズムを提案している。また、文献[11]ではロボットが障害物を迂回している時に障害物境界の接線方向変化というトポロジー的性質に基づき、一つの離脱点の評価基準が提案されている。しかし、このアルゴリズムは収束しない場合がある。

本論文では、文献[11]で提案された障害物境界の接線方向変化というトポロジー的性質に基づく一つのアルゴリズム(ロボットの大きさは考えられていない)を提案する。まず、問題をモデル化してアルゴリズムを提案する。次に、アルゴリズムの収束性と目標位置の到達可能性を説明する。最後にグラフィックスシミュレーションによりアルゴリズムの有効性を確認する。

提案するアルゴリズムは Bug 2 よりもっと積極的なアルゴリズムであるといえる。ロボットの出発位置と目標位置が障害物の“外”にある場合(3章でこの場合を定義する)、このアルゴリズムの経路の長さは多くの場合に Bug 2 や文献[8]のアルゴリズムより短い。また、文献[7]や[9]に比べ、環境のトポロジー的性質の認識の計算が簡単で、一般的に経路情報を記憶するメモリが少ない利点がある。

2. アルゴリズム

2.1 問題のモデル化

実際の移動ロボットは多くの場合有限個の障害物を含む環境で動く。以下の仮定により問題をモデル化する。

(1) 作業空間は有限個の任意の形状の障害物を含む二次元の空間である。障害物の境界は簡単な閉鎖した交差しない曲線

であり、その周囲長は有限とする。また、障害物同士は互いに接触しないものとする。障害物がない空間は自由空間と呼ばれる。

(2) 移動ロボットは点で表現され(したがって、仮定(1)の作業空間は実際のロボットのコンフィギュレーション空間とみなしても良い)、自身の現在位置と目標位置を常に知っている。そして、作業環境における障害物の情報を予め持たないが、内蔵された触覚センサにより現在障害物と接触しているかどうかを自ら判断できるものとする。また、センサ情報により障害物の境界を辿ることができる。

(3) 障害物の境界における鋭い点では、ロボットはセンサ情報を修正し小さい円弧に沿って辿るとする。そうすると、ロボットが実際に辿った経路(以下に障害物の境界とみなす)では接線方向が連続的に変化する。

(4) 移動ロボットは有限なメモリを持ち、通過した経路の特徴を記憶できる。

ここで検討する問題は、出発位置と目標位置をつなぐ衝突回避経路を計画するものである。トポロジーから見るとこの経路は、出発位置と目標位置をつなぐ自由空間における連続的な曲線である。

2.2 アルゴリズム

ここで提案するアルゴリズムによる移動ロボットの経路は、いくつかの目標位置への直線経路と障害物の境界に沿う曲線経路の系列から構成されるものである。第 i 番目の直線経路と障害物の境界の交点は衝突点と呼ばれ、 H_i と書く。ここで直線経路が終わり、曲線経路が始まる。第 i 番目の曲線経路の終点は離脱点と呼ばれ、 L_i と書く。ここで直線経路が始まる。ロボットが障害物を辿る方向(以下に迂回方向と呼ぶ)は時計回りと反時計回りの二つがあるので、予め一つの方角を決めておく。ロボットは障害物を辿る時、現在の迂回方向に応じる障害物境界の接線単位ベクトル(センサ情報より計算できる) r_t と現在位置から目標位置への単位ベクトル r_g を計算する(Fig. 1 に時計回りの場合の r_t と r_g が示されている)。 r_t と r_g が成す平面を x - y 平面として三次元右手座標系を構成する。 $(A)_z$

Fig. 1 Coordinate system

Table 1 $(\mathbf{r}_g \times \mathbf{r}_t)_z$ and $\mathbf{r}_g \cdot \mathbf{r}_t$

Quadrant	1	2	3	4
$(\mathbf{r}_g \times \mathbf{r}_t)_z$	-	+	+	-
$\mathbf{r}_g \cdot \mathbf{r}_t$	+	+	-	-

はベクトル $\mathbf{A}$ の z 軸の成分を表す. Fig. 1 のように x 軸と y 軸を設定すると, x - y 平面の各象限におけるベクトル $\mathbf{r}_t$ に対して $(\mathbf{r}_g \times \mathbf{r}_t)_z$ と $\mathbf{r}_g \cdot \mathbf{r}_t$ の符号は Table 1 のように表される. Table 1 の二つのベクトル計算の符号により $\mathbf{r}_t$ と $\mathbf{r}_g$ の相対的位置関係がわかる.

ロボットは次の五つのリストに, 通過した衝突点と離脱点の座標を記憶する.

- (1) 衝突点歴史リスト(時計回り): 時計回りの時に通過した衝突点の座標を記憶する.
- (2) 衝突点歴史リスト(反時計回り): 反時計回りの時に通過した衝突点の座標を記憶する.
- (3) 離脱点歴史リスト: 通過した離脱点の座標を記憶する.
- (4) 衝突点現在リスト: 通過した衝突点の座標を記憶し, 辿る方向が変わる時に今まで記憶した情報を全部削除する.
- (5) 離脱点現在リスト: 通過した離脱点の座標を記憶し, 辿る方向が変わる時に今まで記憶した情報を全部削除する.

以下に出発位置を S , 目標位置を G とする. アルゴリズムは次のようになる.

始めに, $L_0=S, j=1, N=0, M=0$ とする. 予め決められた迂回方向(時計回り又は反時計回り)を記憶する(以下に記憶した迂回方向を現在方向と呼ぶ). ここで, N は経路のトポロジー的性質を記憶する変数であり, M は目標位置が到達できるかどうかを判断するための変数である.

(1) 次の条件のうちのどちらかが満足されるまで, ロボットは離脱点 L_{j-1} から目標位置への直線に沿って動く.

(a) G 点に到達したらアルゴリズムを終了させる.

(b) 障害物に遭ったら, この点を衝突点 H_j として現在方向に関連する衝突点歴史リストと衝突点現在リストに座標を記憶する.

それから, (2)へ.

(2) ロボットは H_j から現在方向へ障害物を辿る. 動きながら, $(\mathbf{r}_g \times \mathbf{r}_t)_z$ と $\mathbf{r}_g \cdot \mathbf{r}_t$ の符号の変化を監視する. 同時に次の処理を行う.

(a) G 点に到達したらアルゴリズムを終了させる.

(b) 目標位置が到達できるかどうかをチェックする. 現在位置が衝突点現在リストに記憶した衝突点でありかつ離脱点現在リストが空でない場合には, $M=1$ なら $M=0$ とする. 現在位置が衝突点現在リストに記憶した衝突点でありかつ離脱点現在リストが空である場合には, $M=0$ なら $M=1$ とし, $M=1$ なら目標位置は到達できないとして計算を終了する. このステップは(2)の(c)と同時に処理する.

(c) 現在位置が衝突点現在リストに記憶した衝突点でありかつ計算を終了しない場合には, $N=0, j=j+1$ とし, 記憶した現在方向を削除して反対方向を現在方向として記憶する. 衝

Fig. 2 Convex point and concave point

突点現在リストと離脱点現在リストにおける情報を全部削除し, 現在位置は衝突点 H_j として現在方向に関連する衝突点歴史リストと衝突点現在リストに座標を記憶する. 現在方向へ障害物を辿る.

(d) 現在位置は現在方向に関連する衝突点歴史リストに記憶したことがありかつ逆の方向に関連する衝突点歴史リストに記憶していないなら, $N=0, j=j+1, M=0$ とし, 記憶した現在方向を削除して反対方向を現在方向として記憶する. 衝突点現在リストと離脱点現在リストにおける情報を全部削除し, 現在位置は衝突点 H_j として現在方向に関連する衝突点歴史リストと衝突点現在リストに座標を記憶する. 現在方向へ障害物を辿る.

(e) 障害物のトポロジーをチェックする. 以下の結論は現在方向が時計回りの場合であるが, 反時計回りの場合には $\mathbf{r}_t$ の変化方向が反対となる. $\mathbf{r}_t$ が第2象限から第1象限(y 軸の正部分を含む)に入る($(\mathbf{r}_g \times \mathbf{r}_t)_z > 0, \mathbf{r}_g \cdot \mathbf{r}_t > 0$ から $(\mathbf{r}_g \times \mathbf{r}_t)_z \leq 0, \mathbf{r}_g \cdot \mathbf{r}_t > 0$ になる)と, $N=N+1$ とする. $N \neq 1$ なら, 引き続き障害物を辿る. $N=1$ の場合には, この点が離脱点歴史リストに記憶されていなければ, 離脱点 L_j とし離脱点現在リストと離脱点歴史リストに座標を記憶して, $j=j+1, N=0$ とし, (1)へ. この点が離脱点歴史リストに1回だけ記憶されていれば, 記憶した現在方向を削除して反対方向を現在方向として記憶する. 衝突点現在リストと離脱点現在リストにおける情報を全部削除し, 現在位置は離脱点 L_j として離脱点現在リストと離脱点歴史リストに座標を記憶する. $N=0, j=j+1, M=0$ とし, (1)へ. この点が離脱点歴史リストに2回記憶されていれば, 引き続き障害物を辿る.

(f) 障害物のトポロジーをチェックする. 以下の結論は現在方向が時計回りの場合であるが, 反時計回りの場合には $\mathbf{r}_t$ の変化方向が反対となる. $\mathbf{r}_t$ が第1象限(y 軸の正部分を含む)から第2象限に入る($(\mathbf{r}_g \times \mathbf{r}_t)_z \leq 0, \mathbf{r}_g \cdot \mathbf{r}_t > 0$ から $(\mathbf{r}_g \times \mathbf{r}_t)_z > 0, \mathbf{r}_g \cdot \mathbf{r}_t > 0$ になる)と, $N=N-1$ とする.

以下では, 上述のアルゴリズムで $N=N+1$ になる点(現在方向が時計回りの場合には $\mathbf{r}_t$ が第2象限から第1象限(y 軸の正部分を含む)に入る. 現在方向が反時計回りの場合には $\mathbf{r}_t$ の変化方向が反対である. アルゴリズムの(2)の(e)参照)を凸点と呼ぶ. $N=N-1$ になる点(現在方向が時計回りの場合には $\mathbf{r}_t$ が第1象限(y 軸の正部分を含む)から第2象限に入る. 現在方向が反時計回りの場合には $\mathbf{r}_t$ の変化方向が反対である. アルゴリズムの(2)の(f)参照)を凹点と呼ぶ. Fig. 2 には現在方向が時計回りである時の凸点と凹点を示す.

また、上述のアルゴリズムでは、ロボットが障害物を迎える時に現在位置が次の二つの離脱条件のどちらかを満足すれば、離脱点となって直線経路が始まる(アルゴリズムの(2)の(e)).

離脱点条件:

(1) 現在位置は凸点であり、 $N=1$, かつ今まで離脱点歴史リストに記憶されたことがない.

(2) 現在位置は凸点であり、 $N=1$, かつ今まで離脱点歴史リストに1回だけ記憶されている.

ここで上述のアルゴリズムのステップ(1)の場合、この直線がある障害物の一部分の境界に重なり合う時、ロボットはこの障害物に遭わないとみなす.

3. アルゴリズムの収束性と目標位置の到達可能性

本章では、まず自由空間を分類する. それからこの分類に基づき、提案したアルゴリズムの収束性と目標位置の到達可能性を証明する.

アルゴリズムによると、離脱点の必要条件は凸点である. ロボットはこのような離脱点から目標位置への直線に沿って目標位置へ動ける.

3.1 自由空間の分類

定義1 自由空間に属する点から出発する任意の半直線が少なくとも一つの障害物と交差する時、この点はこれらの障害物の内にあるという.

定義2 自由空間に属する点から出発する半直線に全ての障害物と交差しないかつ接しないものが存在する時、この点はこれらの障害物の外にあるという.

Fig. 3 参照.

3.2 目標位置も出発位置も障害物の外にある場合

以下では、ロボットの目標位置も出発位置も障害物の外にある場合を考える. まず、作業空間に障害物が一つしかない場合を考える. 以下の証明では一般性を失うことなく初めの迂回方向を時計回りとする. 反時計回りの場合も同様に証明できる.

ロボットの目標位置と出発位置をつなぐ直線 SG がこの障害物と交差しなければ、アルゴリズムによりロボットは S 点か

ら直線 SG に沿って目標位置に到達できる. 以下に直線 SG がこの障害物と交差する場合を考える. G 点が障害物の外にあるので、G 点から出発する半直線には、障害物に接しかつ接点の他には障害物の境界と交差しないものが2本存在する. このような二つの接点のうち必ず一つは時計回りの時の凸点である. 以下ではこの接点を A 点と呼び、もう一つの接点を B 点と呼ぶ (Fig. 4 参照).

S 点が障害物の外にあるので、同様に S 点に対してこのような2本の接線が存在する. 二つの接点はそれぞれ C 点, D 点と呼ばれる. したがって、障害物は Fig. 4 の斜線領域にしか存在しない. そして、アルゴリズムによる経路も Fig. 4 の斜線領域にしか存在しない.

定理1 作業環境に一つの障害物しかなくかつロボットの出発位置も目標位置もこの障害物の外にある場合、直線 SG がこの障害物と交差すれば、アルゴリズムにより目標位置に到達できる経路は必ず A 点に到達する.

証明: ロボットは S 点から直線 SG に沿って目標位置へ動き、障害物に遭うと衝突点 H_1 から時計回り方向へ障害物を迎える. もし目標位置に到達できる経路が A 点を通過しないな

Fig. 4 Region of path

Fig. 3 Classification of free space

Fig. 5 Proof of theorem 1

ら、必ず Fig. 4 の斜線領域に離脱点 L_j が存在し、 L_j から直線に沿って目標位置に到達できる。したがって、斜線領域には Fig. 5 のように A 点を通過しない経路が存在する。そうすると、この経路は斜線領域を二つの部分に分け、A 点の近傍の障害物の境界と H_1 点の近傍の障害物の境界がこの経路の両側にあることになる。つまり、障害物は自由空間により二つの部分に分けられることになる。これは一つの障害物の仮定に矛盾する。よって、定理 1 が証明された。□

定理 2 作業環境に一つの障害物しかなくかつロボットの出発位置も目標位置もこの障害物の外にある場合、直線 SG がこの障害物と交差すれば、A 点に着く前の経路には 2 回通過した点はない。

証明：ロボットは S 点から直線 SG に沿って目標位置へ動き、障害物に遭うと衝突点 H_1 から時計回り方向へ障害物を辿る。障害物の境界が閉鎖した交差しない曲線なので、ロボットは A 点に着く前に他の離脱点を通過しなければ、必ず A 点に着く。そして、このような経路には 2 回通過した点がない。

A 点に着く前にロボットの経路が離脱点に着くと、定理 1 により新しい衝突点を生じる。S 点から H_1 点までの直線経路は自身交差しない。障害物の境界が交差しない曲線であるから、 H_1 から L_1 までの曲線経路は自身交差しない。そして、アルゴリズムの (1) により、この曲線経路は S 点から H_1 点までの直線経路と交差しない。したがって、離脱点 L_1 までの経路には 2 回通過した点はない。一般性を失うことなく、A 点以外の離脱点 L_{j-1} ($j \geq 2$) までの経路には 2 回通過した点がないと仮定する。離脱点 L_{j-1} からの経路を考える。まず、次の二つの命題を証明する。

(1) 新しい衝突点 H_j は通過したことがない点である。

(2) 衝突点 H_j から次の離脱点 L_j までの経路はいままで生じた衝突点には到達できない。

(1) Fig. 6 の (a) に示すように衝突点 H_j の後の隣接の経路と離脱点 L_{j-1} に着く前の隣接の経路は直線 $L_{j-1}G$ の両側にある。衝突点 H_j は通過したことがあると仮定すると、上述の二つの部分の経路は必ずつながっている。したがって、その経路は直線 $L_{j-1}G$ と交差しなければならない。離脱点 L_{j-1} までの経路には 2 回通過した点がないことにより、交点 E は Fig. 6 の (b) と (c) の二つの場合だけである。(b) の場合は図に示すような閉鎖した経路が存在し、障害物はこの経路により二つの

Fig. 6 Proof of proposition (1) of theorem 2

部分に分けられる。これは一つの障害物の仮定に矛盾する。(c) の場合は図に示すような閉鎖した経路が存在する。そして、E 点と離脱点 L_{j-1} の間には必ず F 点のような凹点が存在する。離脱点 L_{j-1} までの経路には 2 回通過した点がないので、アルゴリズムの (2) の (e) (f) により、F 点後の経路では $N < 0$ となり、 L_{j-1} 点は離脱点条件を満足しない (E 点と離脱点 L_{j-1} の間に一つ以上の凹点と凸点が存在する場合には、定理 3 の証明と同様に、やはり L_{j-1} 点が離脱点条件を満足しないことが証明できる)。これは仮定に矛盾する。以上により、衝突点 H_j はロボットがいままで通過したことがない点である。

(2) ロボットの出発位置は障害物の外にあるので、衝突点 H_1 からの経路はもう 1 回衝突点 H_1 に着くことはできない。

衝突点 H_j から次の離脱点 L_j までの経路を考える。この部分の経路が衝突点 H_j ($i \leq j$ and $i \neq 1$) に着くと仮定する。Fig. 7 の (a) に示すように衝突点 H_j の後の隣接の経路と離脱点 L_{j-1} に着く前の隣接の経路は直線 $L_{j-1}G$ の両側にある。したがって、 H_j 点から H_i 点までの経路と H_i 点と L_{j-1} までの経路のどちらかが必ず直線 $L_{j-1}G$ と交差する。ロボットの経路は自身交差しないので、離脱点 L_{j-1} に着く前の経路には 2 回通過した点がないことにより、交点 E は Fig. 7 の (b) と (c) の二つの場合だけである。図に示すように、二つの場合はどちらの場合もロボットの経路が障害物を二つの部分に分ける。これは一つの障害物という仮定に矛盾する。したがって、命題 (2) が証明された。

以上二つの命題により、A 点以外の離脱点 L_{j-1} までの経路に 2 回通過した点がないければ、離脱点 L_{j-1} から次の離脱点 L_j までの経路には 2 回通過した点がない。離脱点 L_1 までの経路には 2 回通過した点がないので、定理 2 は証明された。□

定理 1 と定理 2 により、上述の場合には A 点までのロボットの経路では、衝突点歴史リストと離脱点歴史リストに記憶した点にもう一度到着することがないので、迂回方向は変わらない (アルゴリズムの (2) の (c) (d) (e))。そして、アルゴリズムの (2) の (b) (c) (d) の操作は行っていない、ロボットは必ず A 点に着く。

定理 3 作業環境に一つの障害物しかなくかつロボットの出

Fig. 7 Proof of proposition (2) of theorem 2

Fig. 8 Proof of theorem 3(1)

Fig. 9 Proof of theorem 3(2)

発位置も目標位置もこの障害物の外にある場合、直線 SG がこの障害物と交差すれば、A 点は離脱点である。

証明：ロボットは S 点から直線 SG に沿って目標位置へ動き、障害物に遭うと衝突点 H_j から時計回り方向へ障害物を辿る。もしロボットが A 点に着く前に凹点を通過しなければ、A 点に着く直前では $N=0$ 、したがって A 点は離脱点条件を満足して離脱点となる。

以下では、ロボットが A 点に着く前に凹点を通過する場合を考える。

一般性を失うことなく、A 点に着く直前の衝突点 H_j からの経路を考える。 H_j 点では $N=0$ である。 H_j 点から A 点までの経路には離脱点と H_j 点以外の衝突点はない。つまり、この部分の経路は障害物の境界に沿う経路である。

衝突点 H_j 点からの経路の始めの凹点は E 点と呼ばれ、必ず Fig. 8 に示すような斜線部分（半直線 SC、S 点から H_j 点までの経路、線分 GH_j と半直線 GA が囲む領域）にある。なぜなら、Fig. 9 のように E 点が斜線部分になければ、ロボットの経路は自身交差しないので、 H_j 点と E 点の間の経路が必ず線分 GH_j と交差する。したがって図のように、 H_j と E 点の間には離脱点条件を満足する凸点 F 点が必ず存在し（ H_j 点と E

Fig. 10 Proof of theorem 3(3)

点の間の経路には凹点がない）、仮定と矛盾する。

半直線 GH_j は上述の斜線部分を二つの部分に分ける。E 点が半直線 SC、S 点から H_j 点までの経路と半直線 GH_j が囲む領域にあると、必ず線分 GE が H_j 点に着く前の経路あるいは半直線 GC と交差する。E 点が半直線 GH_j と半直線 GA が囲む領域にあると、必ず線分 GE が H_j 点から E 点までの経路と交差する。なぜなら、E 点が半直線 GH_j と半直線 GA が囲む領域にあると、E 点の近傍の経路と H_j 点の近傍の経路は半直線 GE の両側にあるからである（Fig. 8 参照）。E 点に着く前の経路が半直線 GE と交差する点を P 点と呼ぶ。P 点が線分 GE 上にないとすると、Fig. 10 に示すように、E 点に着く前に離脱点条件を満足する凸点 F 点に到達し、仮定と矛盾する。だから、P 点は必ず線分 GE 上にある。したがって、線分 GE は E 点に着く前の経路あるいは半直線 SC と交差する。

そうすると、Fig. 8 に示すように E 点後の経路は、E 点に着く前の経路（半直線 SC を含む）と線分 PE が作る閉じた領域にある。その後の経路はこの領域から出するために線分 PE と交差しなければならない。この交点（Q 点）と E 点の間には必ず凸点（R 点）がある。したがって、凹点 E 点後の経路には必ず凸点（R 点）がある。

Q 点後の経路に凹点があれば、同様に閉じた領域が存在し、閉じた領域から出するために必ず R 点以外の凸点が存在する。そうすると、 H_j 点から A 点までの経路には凹点と凸点が対になって生じ、A 点に着く直前には $N=0$ となる（アルゴリズムの(2)の(e)(f))。したがって、A 点に着くと $N=1$ となり A 点は離脱点である。よって定理 3 は証明された。□

ロボットは A 点に到着後は、直線 AG に沿って目標位置 G 点に到達できる。したがって、作業環境に一つの障害物しかなくかつロボットの出発位置も目標位置もこの障害物の外にある場合に対して、アルゴリズムの収束性と目標位置の到達可能性が証明された。

複数の障害物の場合には障害物の数が有限であるので、同様にアルゴリズムの収束性と目標位置の到達可能性が証明できる。

3.3 他の場合

次に、目標位置と出発位置どちらか又は両方とも障害物の内にある場合を考える。この場合にはロボットが障害物を辿る時に通過した経路をもう一度通過する場合があります、経路に閉鎖し

たループが存在する。

ロボットの経路では各衝突点での動き方が二つ（時計回りと反時計回り）しかなく、各離脱点での動き方が三つ（現在方向を記憶して離脱、現在方向の逆方向を記憶して離脱および離脱しない）しかない。この場合のアルゴリズムは、衝突点歴史リストと離脱点歴史リストに記憶した情報に基づき、Fig. 11に示すように縦型探索法により各衝突点と離脱点の動き方を一つずつ探索し（アルゴリズムの(2)の(c)(d)(e)）、ある離脱点から直線に沿って目標位置に到達できれば、経路が見つかったとして計算を終了する。このような離脱点があれば、有限回の繰り返しの後ですべての離脱点を2回通過（離脱点歴史リストに2回記憶）、障害物を迂回する時に離脱点がなくなり（アルゴリズムの(2)の(e)）、したがってロボットは離脱せず衝突点に戻るようになる。この時には可能経路がないとして計算を終了する（アルゴリズムのステップ(2)の(b)）。したがって、アルゴリズムの収束性が保証された。

以下にアルゴリズムの目標位置の到達可能性を説明する。目

Fig. 11 Depth-first search

Fig. 12 Simulation (1)

標位置と出発位置どちらか又は両方とも障害物の内にあり、そして実行可能経路が存在する場合を考える。アルゴリズムを適用する際にその境界上の点が衝突点となる障害物には、目標位置までの直線がその障害物自身と交わらないような凸点が存在する。ロボットがこの障害物を辿って可能経路がないという結果を得る前に、この凸点に少なくとも1回は到着する。しかし、その時にこの凸点が離脱点条件を満足するかどうかはまだ厳密には証明されていない。したがって、この場合には提案したアルゴリズムはヒューリスティックなものである。しかし、アルゴリズムによりいままで行った様々なシミュレーション例では目標位置の到達可能性が保証されている。

上述の説明により、出発位置と目標位置が障害物の外にある場合、離脱点がA点のような接点であることから、このアルゴリズムの経路の長さは多くの場合 Bug 2 や文献[8]のアルゴリズムより短い。したがって、このアルゴリズムはより積極的なアルゴリズムであるといえる。そして文献[7]や[9]と比べ、環境のトポロジー的性質の認識の計算が簡単で、一般的に経路情報を記憶するメモリが少ない利点がある。

4. シミュレーション例

提案したアルゴリズムにより、様々なグラフィックスシミュレーションを行った。以下に四つの例を示す。Fig. 12 と Fig. 13 はロボットの出発位置と目標位置が障害物の外にある場合

Fig. 13 Simulation (2)

Fig. 14 Simulation (3)

Fig. 15 Simulation (4)

を示す。この二つの例では提案したアルゴリズムの経路は Bug 2 や文献[8]の経路より短い。Fig. 14 と Fig. 15 はロボットの出発位置が障害物に囲まれた領域にある例 (Fig. 15 は文献[6]の一つの問題に対する経路) である。

5. あとがき

本論文では、二次元未知環境における移動ロボットの衝突回避経路計画問題について、環境のトポロジーの性質に基づいた一つの積極的なアルゴリズムを提案した。そして、シミュレーション例により提案したアルゴリズムの有効性を検証した。

一方、アルゴリズムの目標位置の到達可能性はまだ厳密には証明されていない。今後の課題としては、

(1) アルゴリズムの目標位置の到達可能性を証明する。

(2) 実行可能経路が存在するにもかかわらず目標位置に到達できない例を見出し、アルゴリズムを改善する。
などが挙げられる。

参考文献

- [1] J. T. Schwartz and M. Sharir: "On the piano movers' problem: I. The case of a two-dimensional rigid polygonal body moving amidst polygonal barriers," *Comm. Pure Applied Math.*, vol. 36, pp. 345-398, 1983.
- [2] V. Lumelsky and K. Sun: "A unified methodology for motion planning with uncertainty for 2D and 3D two-link robot arm manipulators," *Int. J. Robotics Res.*, vol. 9, no. 5, pp. 89-104, 1990.
- [3] V. Lumelsky and A. Stepanov: "Dynamic path planning for a mobile automaton with limited information on the environment," *IEEE Tran. Automa. control*, vol. AC-31, no. 11, pp. 1058-1063, 1986.
- [4] V. Lumelsky and A. Stepanov: "Path planning strategies for a point mobile automaton moving amidst unknown obstacles of arbitrary shape," *Algorithmica*, vol. 2, pp. 403-430, 1987.
- [5] V. Lumelsky and T. Skewis: "Incorporating range sensing in the robot navigation function," *IEEE Tran. Syst. Man Cybern.*, vol. 20, no. 5, pp. 1058-1069, 1990.
- [6] V. Lumelsky: "A comparative study on the path length performance of maze-searching and robot motion planning algorithms," *IEEE Tran. Robot. Automa.*, vol. 7, no. 1, pp. 57-66, 1991.
- [7] 吉岡, 登尾: "作業空間のトポロジーとパスプランニングアルゴリズムのデッドロック生起との関係について," 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 781-784, 1992.
- [8] 服部, 登尾: "空間形状に応じて距離関数を動的に変化させるセンサベーストパスプランニングアルゴリズム," 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1063-1066, 1993.
- [9] 吉岡, 登尾: "連続/再帰記憶によるセンサベーストパスプランニング," 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1067-1070, 1993.
- [10] 登尾, 橋目: "可能領域を持つ移動ロボットの未知空間における実際的なパスプランニングアルゴリズム," 日本ロボット学会誌, vol. 10, no. 3, pp. 378-384, 1992.
- [11] 楊, 山本, 毛利: "ポテンシャル関数を用いる複雑な環境における移動ロボットの衝突回避経路計画," 日本機械学会九州支部第47期総会講演会講演論文集, pp. 277-280, 1994.

楊 向東 (Xiang Dong Yang)

1966年5月17日生。1989年、中国清華大学精密計器系卒業。1992年から1994年まで、九州大学工学部知能機械工学科留学。1994年中国清華大学精密計器系博士課程卒業。現在清華大学教官。ロボットモーションプランニングの研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

毛利 彰 (Akira Mohri)

1941年6月23日生。1969年九州大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学(生産機械工学専攻)。同年九州大学工学部講師。助教授を経て、82年同教授。現在に至る。ロボット工学、制御工学の研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

山本元司 (Motoji Yamamoto)

1962年7月10日生。1990年九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了(生産機械工学専攻)。同年九州大学工学部講師。92年同助教授。現在に至る。ロボット工学の研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)