

Generalized Voronoi Graph を用いた移動ロボットの未知環境探索動作 ～ ステアリング型移動ロボットの経路の評価と経路の生成 ～

Mobile Robot Exploration based on Generalized Voronoi Graph ～ Evaluation of Path for Steering type mobile robot and Path planning ～

正 田中 豊(岡山大学)

正 永谷 圭司(岡山大学)

学 岩井 洋介(岡山大学院)

Yutaka TANAKA, Okayama University, 3-1-1, Tusimanaka, 700-8530 Okayama
Keiji NAGATANI, Okayama University
Yosuke IWAI, Graduate School of Engineering, Okayama University

KeyWords; Sensor Based Exploration, Mobile Robot, Generalized Voronoi Graph, Steering type Configurations space

1. はじめに

自律型の移動ロボットが未知の環境に置かれた場合、ロボット自身によって自己のおかれた環境を探索・把握する能力が重要となる。

現在、筆者らの研究グループでは移動制御の安定性・エネルギー効率などの点から、ステアリング型の移動機構をもつロボットに関する研究を行っている。そこで、本研究では、このようなロボットにおいても未知の環境に対する探索を行うことが必要であると考え、ステアリング型の移動ロボットによる未知環境探索動作の実現を目的とした。

ロボットが、このような能力を実現する方法として、Generalized Voronoi Graph(以下 GVG と略す)に基づいた未知環境探索手法が提案されている^{[1][2]}。この手法によりロボットは自分自身で、比較的容易に移動可能範囲内の環境情報を得ることが可能となる。しかしながら、この手法では構築される GVG をそのまま経路とするために、不連続な経路上を移動する必要が生じる場合がある。このため、本研究において対象としたようなロボットにこの手法をそのまま適用することはできない。

以下では、GVG に基づいた未知環境探索手法をステアリング型のロボットに適用するため、できるだけ GVG に沿った走行可能な経路の生成手法について述べる。

2. アルゴリズムの概要

GVG に基づいた未知環境探索動作を行う場合、逐次構築した GVG をロボットがトレースすることで探索動作の実現が可能となる。

この GVG とは、“周囲の障害物から最も離れている点の集合とも言い換えることができる。したがって、ロボットが距離情報を取得のためにセンサを用いて移動することを考慮すると、GVG 上を移動することは、非常に有用であると考えられる。

しかしながら、構築される GVG は環境に依存するため、ロボットが非ホロノミックな移動拘束を受ける場合、これを完全にトレースすることが不可能な場合が生じる(Fig.1 参照)。

本研究では、構築した GVG に対してできるだけ沿ったローカルな経路を構築するためにするために以下の手順で経路の計画を行う。

- 1) 周囲の環境情報に基づいて GVG を構築する。
- 2) 到達可能な経路を複数生成する。
- 3) 各経路が GVG にどれだけ沿っているか評価を行う。
- 4) 評価値に基づいて、走行経路の選択を行う。

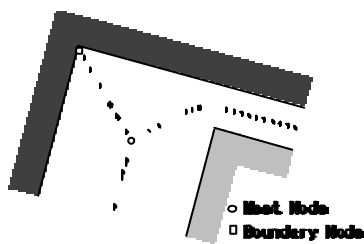


Fig.1 GVG

3. コンフィギュレーション空間

実環境内において移動ロボットの経路計画を行う場合には、位置だけではなく姿勢にも考慮する必要がある^[3]。このため、本研究では位置及び姿勢をパラメータとするコンフィギュレーション空間(以下 C-space と略す)を利用し、以下ではこの C-space について述べる。

C-space とは、障害物に囲まれたある環境内において、そのロボットが配置可能な範囲を各姿勢について集めたものである。特に、ロボットの重心と回転中心が異なる場合には、姿勢について 0 から 360 度までの空間の構築が必要となる。

この空間を利用することによって、ロボットを点として見なして経路の計画をすることができ、C-space 内の一点を指定することで実世界でのロボットの位置・姿勢を表すことが可能である。

本研究においては、位置に関する二次元平面上で経路計画を行い、C-space 空間内において計画された経路を評価することで、実世界での経路生成を行う。

4. 経路の評価

C-space 内で、計画されたある経路の評価を行うために、以下の評価関数を定義する。

この評価関数では、ロボットの各姿勢における作業空間(work space)内で、GVG 上の最も近い点 v_i までの距離 $d_v(x)$ と、障害物(C-obstacle)までの最も近い点 c_i までの距離 $d_{co}(x)$ に

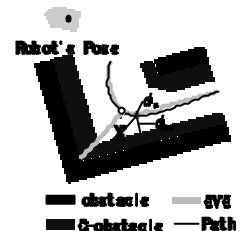


Fig.2 Evaluation of Path

基づいた評価を行う。ただし、 x は各作業空間内でのロボットの位置を表すものとする。

$$d_v(x) = \min \| x - v_i \| \quad (1)$$

$$d_{co}(x) = \min \| x - c_i \| \quad (2)$$

$$j(x) = \left\{ a d_v(x) + (1-a) \frac{1}{d_{co}(x)} \right\} \quad (3)$$

(0 a 1)

変数 a は二つの距離関数 $d_v(x), 1/d_{co}(x)$ に対する重みを表す係数である。 $a=1$ の場合は、障害物までの距離は考慮しない。このため、GVG に最も近い経路の評価値が高くなる。逆に $a=0$ の場合は、C-obstacle から最も離れた経路の評価値が高くなる。

この得られたロボットの位置 x における評価値 $J(x)$ を、経路の始点から終点までの範囲 L で位置に関して積分したものがこの経路の評価値となる。

$$J = \int_L j(x) dx \quad (4)$$

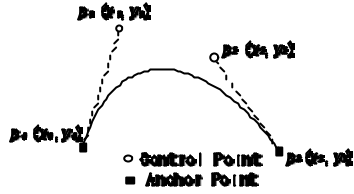
本研究では、計画された全ての経路に対してこの評価式を適用し、評価値を最も小さくするものを実際の走行経路として選択する。

5. 到達可能経路の生成

ここではステアリング型の移動ロボットによっても走行可能な経路の計画手法について述べる。

ある環境に対して走行可能な経路は無数に存在する。このため、本手法では、初期状態(位置・姿勢)と目標状態を含む GVG 上の各ノード間の経路を計画し、以下で示す移動及び環境による拘束条件を適用することで、到達可能な経路を生成する。

本研究においては、ローカルな経路を 3 次 Bezier 曲線を用いて計画する。この 3 次 Bezier 曲線では、それぞれ 2 つの錨点と制御点を指定することで錨点を通り、隣接する制御点との直線に接した微分可能な曲線を表示することができる (Fig.3 参照)。



この曲線は、錨点を

Fig.3 3 degree Bezier curve

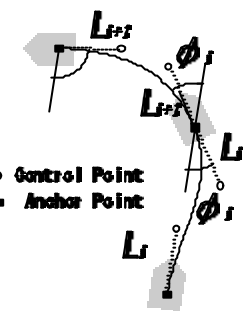
$p_0=(x_0,y_0), p_1=(x_1,y_1)$ とし制御点を、 $p_2=(x_2,y_2), p_3=(x_3,y_3)$ とすると、以下の式で表される。

$$x(u) = (1-u)^3x_0 + 3u(1-u)^2x_1 + 3u^2(1-u)x_2 + u^3x_3 \quad (5)$$

$$y(u) = (1-u)^3y_0 + 3u(1-u)^2y_1 + 3u^2(1-u)y_2 + u^3y_3 \quad (6)$$

$$(0 \leq u \leq 1)$$

さらに、この 3 次 Bezier 曲線をローカルな経路計画に適用する場合、初期及び目標状態での位置及び姿勢に関する情報は与えられている。このため、あるノード i におけるロボットの姿勢を θ_i とし、隣接する制御点間までの距離を L_i 及び L_{i-1} とする。これにより、計画した経路は、これらのパラメータによって表現することが可能となる (Fig.4 参照)。



上述の手法で計画された経路が、ステアリング型の移動ロボットによっても走行可能な経路であるためには、以下で示す ()・ () の拘束条件を満たす必要がある。

移動拘束条件

非ホロノミックな移動拘束を持つロボットによっても、その最初回転半径以上の半径を持つ円弧と、その共通接線線上はトレースすることが可能である。

ロボットの最小回転半径が R である場合、この半径を持つ円の曲率 ρ は以下の式により得ることができる。

$$\rho = \frac{1}{R} \quad (7)$$

つまり、3 次 Bezier 曲線により計画された経路の曲率が $0 \leq u \leq 1$ の範囲で ρ よりも小さければ、対象とするロボットによってもトレース可能であるといえる。

環境拘束条件

無衝突経路 (collision-free path) であるためには、走行経路は C-space 内の曲線でなければならない^[1]。

ここで、位置情報には式(5)(6)に示した $x(u), y(u)$ を用い、姿勢に関するパラメータ θ は、次の式で表す数値を用いることで C-space に投影する。

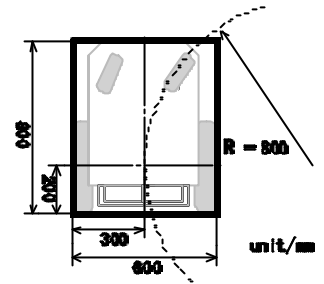
$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{y'(u)}{x'(u)} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{dy/du}{dx/du} \right] \quad (8)$$

これにより本研究では、C-space 内 d で無衝突経路の判定を行う。

6. シミュレーション実験

3 章で示した経路経計画法および、4 章で示した経路選択法に基づいてシミュレーション実験を行った。

対象としたロボットのモデルを Fig.5 に示す。計算の簡略化のためにロボットの形状を 600×800 mm の長方形で近似した。なお、このモデルの持つ最小回転半径 R は 800 mm である。



シミュレーションでは、本手法で示した経路評価式において、 $\alpha=1$ 及び $\alpha=0$ とした場合である。

Fig.6 は、それぞれの場合において C-space 内で選択された経路であり、Fig.7 が実際の走行経路となる。

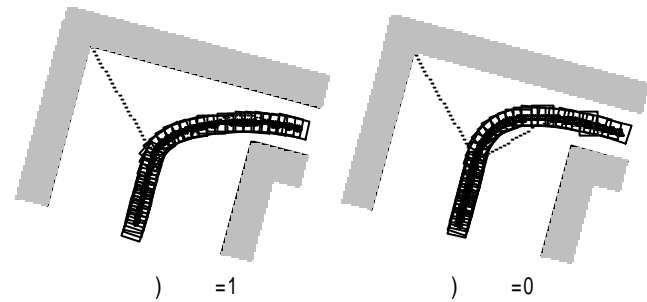
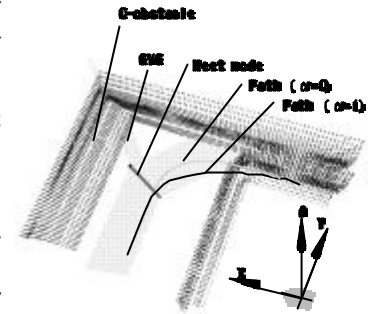


Fig.7 Path

本論文で示した手法により $\alpha=1$ の場合には、GVG にできるだけ沿った経路が生成されており、 $\alpha=0$ の場合は、C-obstacle からの距離を考慮することでロボットの形状及び周囲の環境を考慮した経路が生成されている。

7 まとめと今後の課題

本論文では、ステアリング型の移動ロボットができるだけ GVG に沿った走行を行うための経路経路計画を行い、評価関数を用いて走行経路の生成を行った。

今後の課題としては、本手法に基づいた、実ロボットによる切り返しも含めた経路生成・走行を行うことである。これによりステアリング型の移動機構をもつロボットによる未知環境探索動作の実現を目指していきたい。

参考文献

[1] H.Choset and I.Konuksven and A.Rizzi : Sensor Baesd Planning:A Control Law for Generating the Generalized Voronoi Graph,Proc.of IEEE Int. Conf.on Autonomous Robots,1977.
 [2] Keiji Nagatani and Howie Choset and Sebastian Thrun : Toward Exact Localization without Explicitit Localization,Proc.of IEEE International Conf .on Robots and Automation,pp342-348,1998.
 [3] Jean-Claude Latombe : Robot Motion Planning , Kluwer AcademicPublishers
 [4] Mark de Berg ,Marc van Kreveld , Mark Overmars , Otfried Schwarzkopf: Computer Geometry Alghorithms and Applications.