

車両型ロボットの経路生成に関する一手法の提案

鈴木 一平*

今井 桂子†

* 中央大学大学院 理工学研究科 情報工学専攻

† 中央大学 理工学部 情報工学科

概要 本研究では非ホロノミックな拘束を持つ車両型ロボットの滑らかな経路生成に対する手法を提案する。滑らかというのは車両の前輪の向きが連続的に変化することをいう。これまで、クロソイド曲線を用いた手法や、二つの異なる配置間を滑らかにつなぐ関数 Steer を用いた手法 [2] が提案されてきた。一方、Voronoi 図を用いれば、障害物から最も離れた経路を生成できることが知られている。本手法では、これら既存の手法を組み合わせ、車両型ロボットが前輪の向きを連続的に変化させながら、かつ障害物から離れた安全な経路を走行できるような経路を生成する。さらに、シミュレーション実験をおこない、本手法の有効性を示す。

A Method of Smooth Path Planning for a Car-like Robot

Ippei SUZUKI*

Keiko IMAI†

*Information and System Engineering Course,

Graduate School of Science and Engineering, Chuo University

†Department of Information System and Engineering, Chuo University

Abstract In this paper, we consider a path planning problem for a car-like robot in motion planning. For a car-like robot with nonholonomic constraints, its path should be smooth and the steering angle has to change continuously. Various techniques have been proposed for this problem. For example, the method using clothoid curves and canonical path planning [2] are given. However, those methods do not give a consideration to obstacles in the work space. On the other hand, the robot can give a wide berth to obstacles when it goes along the path obtained by Voronoi diagram of the obstacles. We integrate those methods and propose a new method of finding a path for a car-like robot. In other words, by using the path, the robot can move smoothly and avoid a collision with an obstacle as far as possible.

1 はじめに

ロボットの自律移動において、障害物に衝突せずに目的地に到達することは重要な課題である。この問題は計算幾何学やロボット工学の分野で数多く研究され、様々な手法が提案されてきた。その中でも車両型ロボットは汎用性が高く、移動機構を構築するのに最も有力なモデルの一つである。

一般に、車両型ロボットは、ある拘束によって運動が制限されることが知られている。例えば、その場で回転したり、車両の向きに対して真横に移動したりすることはできない。このような拘束を持つシステムは非ホロノミックシステムと呼ばれ、制御工学やシステム工学の分野で非線形制御の一種として数多くの研究がなされてきた。したがって、車両型ロボットの動作を計画するためには大

域的な経路探索だけでなく、局所的な動作についてもその制限内での移動を考える必要がある。これまで、車両型ロボットの経路として直線と円弧を組み合わせたもの [1] やクロソイド曲線を利用したもの [3]、さらには、異なる二つの配置間を滑らかにつなぐ手法 [2] などが提案されてきた。しかし、ロボットと障害物との距離を考慮し、その通路が通過できるかどうかの判定をおこない、その上で安全性の高い経路を生成する手法は少ない。

一方、大域的な経路探索手法である Voronoi 図を用いたロードマップ法では障害物から最も離れた経路を得ることができ、より安全な走行を計画することができる。

本研究では、障害物が存在する空間に対し Voronoi 図を探索して得られた経路を基に、車

両型ロボットが滑らかに走行できるような手法を提案する。さらに、シミュレーション実験をおこない、その結果を報告する。ただし、対象とするロボットは走行速度が十分に遅く、車輪の滑りは考えないものとする。

2 Voronoi 図を用いた経路探索

点や線、多角形などの一般図形 P_1, P_2, \dots, P_k が与えられたとき、平面上の任意の点 p に対して、図形 P_i までのユークリッド距離の最小値を $dist(p, P_i)$ とする。このとき、各図形に対する Voronoi 領域は次式で与えられる。

$$V(P_i) = \bigcap_{i \neq j} \{p | dist(p, P_i) \leq dist(p, P_j)\} \quad (1)$$

領域の $V(P_1), V(P_2), \dots, V(P_k)$ による分割を一般図形 Voronoi 図という。

障害物が与えられた空間内で、障害物以外の領域を自由空間という。Voronoi 図を用いれば、自由空間を表現するデータ構造を得ることができる。Voronoi 点と Voronoi 辺によって作られるグラフ構造を Voronoi グラフという。この Voronoi グラフを探索することによって、ロボットの経路を生成することができる(図 1)。このとき、ロボットが点ロボットであれば、この経路は障害物から最も離れたものとなり、衝突の可能性が最も低い経路となる。

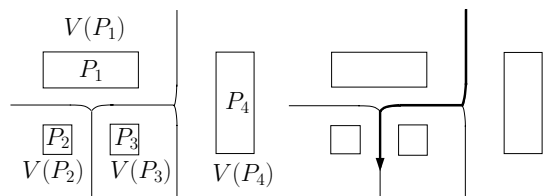


図 1. Voronoi 図を用いた経路探索

3 車両型ロボットの定式化

本研究では、車両型ロボットとして図 2 に示す 4 輪車モデルを扱う。後輪軸の中心を車両の参照点 $Q(x, y)$ とし、車両の x 軸に対する向きを θ 、車両の向きに対する前輪の向きを ϕ 、前輪軸と後輪軸との距離を l とする。入力をロボットの走行速度 v 、前輪の角速度 ω とする。状態変数を $X = (x, y, \theta, \phi)^T$ とおくと、モデルは次式で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta & 0 \\ \cos \phi \sin \theta & 0 \\ \frac{1}{l} \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (2)$$

このとき、前輪の向き ϕ には上限 ϕ_{\max} が与えられ、ロボットの移動中は常に $|\phi| \leq \phi_{\max}$ を満たす。

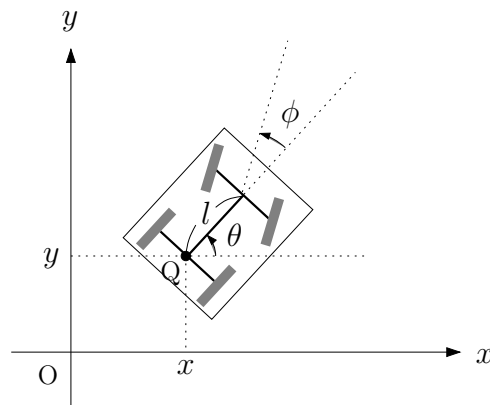


図 2. 車両モデル

4 車両型ロボットの経路生成

Voronoi グラフ上を走行すれば衝突の可能性が低いことは前述の通りであるが、車両型ロボットは非ホロノミックな拘束により行動が制限されるため、Voronoi グラフ上を忠実に追従することはできない。そこで、制限の範囲内においてできるだけ Voronoi グラフに近い経路を走行するように車両型ロボットの動作を計画する必要がある。ロボットと障害物のミンコフスキー差をとり、コンフィギュレーション空間を求めれば正確に障害物を回避する経路を生成することができる。しかし、この場合、ロボットが動く度にコンフィギュレーション空間を求めなければならず、膨大な計算時間がかかってしまう。そこで、ロボットの経路を円弧や関数で近似し、その上をロボットが走行したときに障害物との衝突判定をおこなう。以下では、車両型ロボットが追従可能な経路について述べる。

4.1 直線と円弧の組み合わせ

ロボットの走行速度が十分に遅く、車輪の滑りを無視できるとき、前輪の向きを固定すれば車両型ロボットは円軌道を描く。このことから、図 3 に示すようにロボットの経路は有限個の直線と円弧の組み合わせで近似することができる [1]。このとき、円弧の半径はロボットの最小回転半径より大きいものとする。

しかし、直線と円弧の組み合わせでは連結部分で曲率が不連続なため、急激な遠心加速度を受けてしまい、ときには横転の危険もある。そのため車両型ロボットは据え切りをおこなわなければならない。

ず、滑らかな動作とは言い難い。そこで、車両型ロボットの経路として、曲率が連続的に変化するような曲線が求められる。

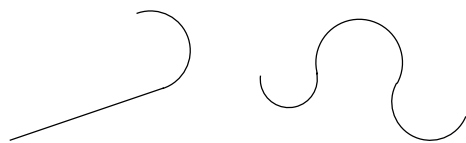


図 3. 直線と円弧の組み合わせ

4.2 クロソイド曲線

クロソイド曲線とは、曲線長に比例して曲率が一定の割合で変化する曲線である。車両型ロボットが等角速度でハンドルを切り、等速度で走行するときの軌跡はクロソイド曲線となる。曲線長を L 、曲線の末端での曲率半径を R とすると、 L と R の積が一定 (A^2 とおく) となることから、クロソイド曲線は次式で定義される。

$$L \cdot R = A^2 \quad (3)$$

クロソイド曲線に関する主要要素を以下に示す(図 4)。

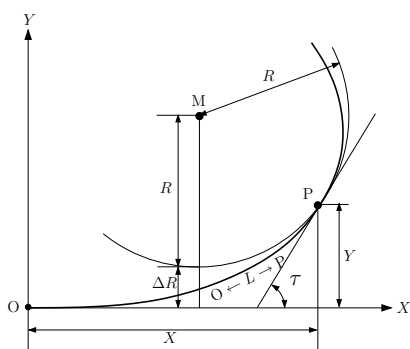


図 4. クロソイド要素

- O: クロソイド原点
- OX: 主接線 (原点における曲線の接線)
- P: 曲線上の任意の点
- M: P 点における曲率の中心
- X, Y: P 点の OX, OY 軸に関する直角座標
- L: O から P 点までの曲線長
- R: P 点における曲率半径
- ΔR : 移程量 (シフト)
- τ : P 点における接線角

クロソイド曲線は相似性を持つため、 $A = 1$ の単位クロソイド曲線に対して諸要素を計算しておく

ば、パラメータの違う曲線は A 倍するだけでよい。単位クロソイド曲線を図 5 に示す。

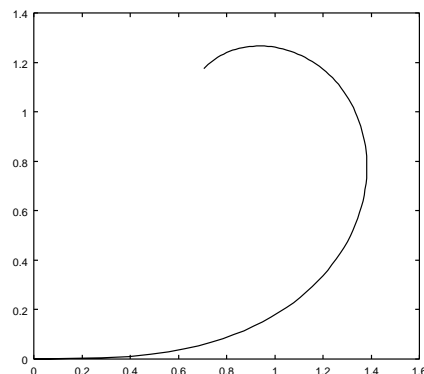


図 5. 単位クロソイド曲線

単位クロソイド曲線の基本式

単位クロソイド曲線における任意の点 P の座標を (x, y) 、曲線長を l 、曲率半径を r とすると、単位クロソイド曲線は次式で定義される。

$$l \cdot r = 1 \quad (4)$$

また、単位クロソイド曲線は以下の基本公式をもつ。

$$\tau = \frac{1}{2} l^2 = \frac{1}{2r^2} = \frac{1}{2} \cdot l/r \quad (5)$$

$$l = \sqrt{2\tau} = \frac{1}{r} = l/r \cdot r = \sqrt{l/r} \quad (6)$$

$$x = \sqrt{2\tau} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{(4i-3)\{(2i-2)!\}} (-1)^{i+1} \tau^{2i-2} \right\} \quad (7)$$

(実用的には $n \geq 4$)

$$y = \sqrt{2\tau} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{(4i-1)\{(2i-1)!\}} (-1)^{i+1} \tau^{2i-1} \right\} \quad (8)$$

(実用的には $n \geq 4$)

4.3 Canonical paths, canonical curves

ここでは、[2] に紹介されている経路生成手法 Steer について述べる。この手法はロボットの二つの異なる配置間を追従可能な滑らかな曲線で結ぶというものである。得られた曲線の接線からロボットの向き θ が簡単に計算でき、さらに、曲線上の任意の点における曲率 κ から $\kappa = \tan \phi$ の関係によって前輪の向きも求まる。任意の配置 $X = (x, y, \theta, \phi)$ が与えられたとき、 ϕ を一定に保てば X を通る追従可能な経路が唯一定まる。この経路を canonical path といい $\Gamma(X, s)$ で表す。これは、(2) 式において $\omega = 0$ としたときに時間 $[0, s]$ の区間で得られる経路である。このとき、口

ボットの参照点の軌跡を canonical curve といい $\gamma(X, s)$ で表す. $\gamma(X, s)$ は $\phi \neq 0$ のとき円弧となり, $\phi = 0$ のとき直線となる.

次に, 以下のような性質を満たす単調増加関数 α を考える.

$$\begin{aligned} \alpha(0) &= 0, \alpha(1) = 1, \\ \dot{\alpha}(0) &= \dot{\alpha}(1) = 0 \end{aligned}$$

この α を用いて二つの異なる配置間の滑らかな経路は次式で表される.

$$P(t) = (1 - \alpha(t))\gamma(X_1, t) + \alpha(t)\gamma(X_2, t - 1) \quad (9)$$

$P(t)$ は $t = 0$ のとき X_1 となり, $t = 1$ のときは X_2 となる. すなわち t を 0 から 1 まで動かせば $X_1 X_2$ 間の滑らかな経路が求まる. このとき, Steer により生成された曲線の曲率 κ は連続的に変化する.

5 経路生成アルゴリズム

車両型ロボットが Voronoi グラフの直線部分を追従走行できることは明確である. そのため, 曲線部分に対して新たな経路を生成する必要がある. また, 無駄な計算を減らすためにカーブが通過可能かどうかの判定をおこない, 通過可能である場合のみ滑らかな経路を生成する.

5.1 通過可能性判定

車両型ロボットが最小回転半径で進むときに通過する領域 (以下 D) の内側の円の半径を r , 外側の円の半径を R とする. カーブ通過前の道幅を w_1 , 通過後の道幅を w_2 , カーブの回転角を ζ とする (図 6). このとき, w_1 が満たすべき条件は以下のようになる.

$$w_1 > R - r \sin \left(\arccos \left(\frac{R - w_2}{r} \right) - \zeta + \frac{\pi}{2} \right) \quad (10)$$

もし, w_1 が (10) 式を満たすなら, 車両型ロボットはこのカーブを通過できる可能性があり, そのようなカーブについてのみ滑らかな経路を生成する.

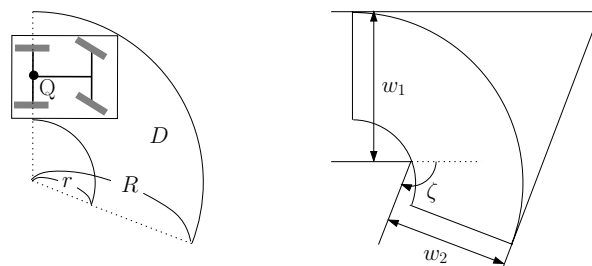


図 6. 通過可能性判定

5.2 D の埋め込み

通過可能と判定された場合, そのカーブに対して障害物との距離の最小値が最大になるように D を埋め込む (図 7). このとき, ロボットの参照点 Q の描く軌跡 D^* はカーブを走行する際, 最も安全な経路となる. したがって, Voronoi グラフの直線部分と D^* を組み合わせれば, 全体を通して安全な経路を生成することができる.

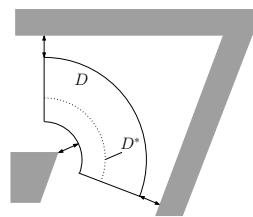


図 7. D の埋め込み

5.3 Voronoi グラフと D^* の結合

抽出した Voronoi グラフの直線部分と, 埋め込まれた D^* を滑らかな経路で結合する.

クロソイド曲線による結合

D^* が Voronoi グラフよりも内側にあり, Voronoi グラフの長さが十分確保できるとき, クロソイド曲線による結合が有効である. D^* の中点をサブゴールとし, その接線と Voronoi グラフのなす角を τ とする. さらに, サブゴールと直線部分の垂直距離を Y とすると (図 8), クロソイド曲線は以下の手順で求まる.

- i τ を用いて (5),(7),(8) 式から r, x, y を求める.
- ii $A = Y/y$ よりパラメータ A を求める.
- iii r, x を A 倍し, 求めたいクロソイド曲線の諸要素を求める.

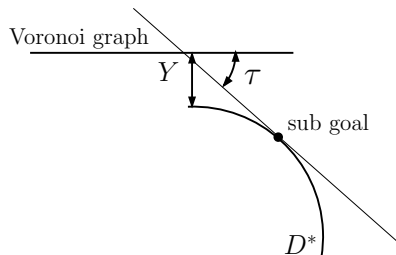


図 8. クロソイド曲線による結合

Steer による結合

得られた Voronoi グラフと D^* をできるだけ D^* 上の経路を長く取るように滑らかな経路を生成する (図 9). D^* 上におけるロボットが追従する経路を d^* とおく. 経路生成は以下の手順でおこなう.

- i D^* の中点にサブゴール g を置く ($d^* = g$).
- ii Voronoi グラフの直線部分を徐々に探索し, $P(t)$ が障害物と衝突せず, $|\phi| \leq \phi_{\max}$ を満たすような配置を見つける.
- iii D^* 上で d^* を徐々に伸ばし, 衝突判定, ϕ の判定をおこないながら経路を変形させる.
- iv d^* が D^* と一致したら反復を終了する.

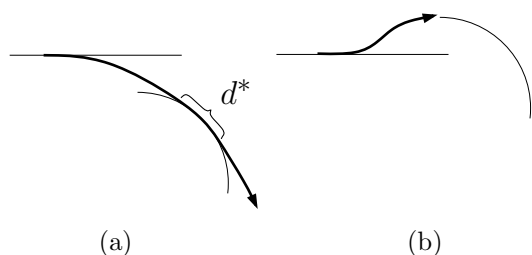


図 9. Steer による結合 : (a) D^* が Voronoi グラフの内側にある場合. (b) D^* が Voronoi グラフの外側にある場合.

以上のことから, アルゴリズムの全体は以下のようなになる.

- 1 与えられた障害物に対して Voronoi グラフを求める.
- 2 得られた Voronoi グラフ上を探索し, 初期経路を求める.
- 3 初期経路の直線部分を抽出する.
- 4 曲線部分に対して通過可能かどうかの判定をおこなう.

- 通過可能であれば次のステップへ.
- そうでなければ, 別の初期経路を選ぶ.

- 5 曲線部分に D を埋め込む.
- 6 クロソイド曲線, または Steer を適用して直線部分と D^* をつなぐ.

6 計算機実験

Voronoi グラフの直線部分が直交するようなクランク型の経路に対し, Voronoi グラフと D^* をクロソイド曲線につないだ場合と Steer を適用してつないだ場合について, $\phi_{\max} = \pi/4[\text{rad}]$ として計算機実験をおこなった. クロソイド曲線を用いた場合の経路を図 10 に示す.

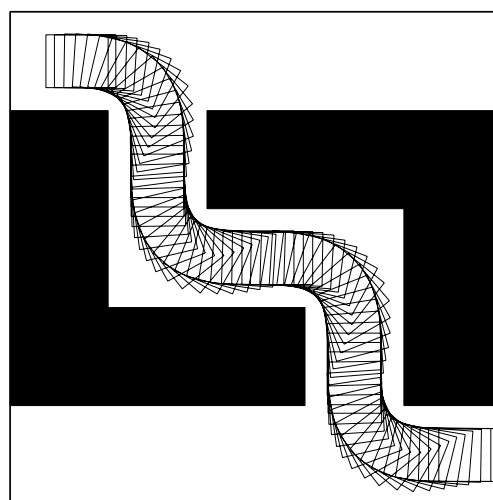


図 10. クロソイド曲線を用いた場合の経路

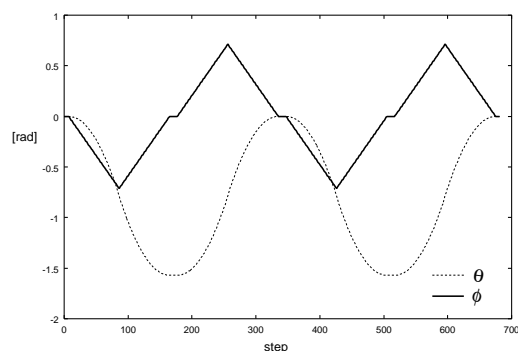


図 11. クロソイド曲線を用いた場合の角度変化

クロソイド曲線を用いた場合, 前輪の向き ϕ は一定の割合で変化しているのが分かる (図 11). θ も滑らかに変化し, 全体として滑らかな経路が生成された.

次に, Steer を適用した場合の経路を図 12 に示す.

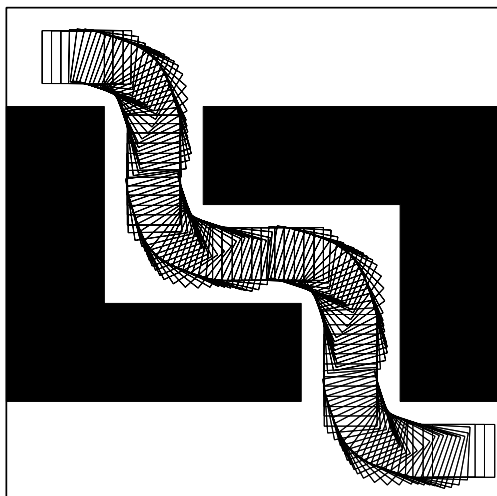


図 12. Steer を適用した場合の経路

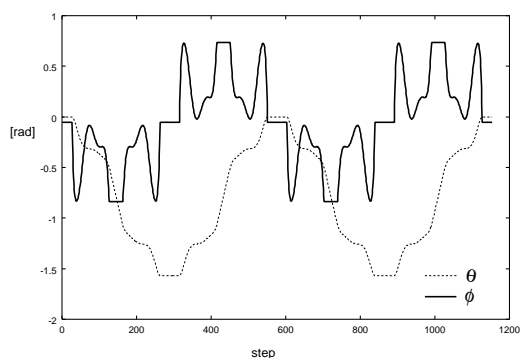


図 13. Steer を適用した場合の角度変化

Steer を適用した場合, ϕ は連続的に変化するが角速度が一定である保証はない. 図 13 を見ると, 直線から D^* に向かう瞬間, D^* 上, さらに D^* から直線に戻る瞬間に大きくハンドルを切っているのが分かる. しかし, 車両の向き θ は滑らかに変化している.

次に, 障害物からの距離を測りそれぞれを比較する(表 1). 比較対象として Voronoi 図を使用せずに曲線部分を Steer によってつないだ経路を用いた. Steer を適用した場合, Voronoi 図を用いた経路と用いない経路では, 障害物からの最小距離に大きな差が出るのが分かる. これにより, 車両型ロボットに対しても Voronoi 図を用いた経路生成の有効性を示せた.

表 1. 障害物からの距離の比較

| | 最小値 | 最大値 | 平均値 |
|-------------------|-------|-----|-------|
| クロソイド曲線を用いた場合の経路 | 13.33 | 23 | 18.41 |
| Steer を適用した場合の経路 | 11.55 | 23 | 16.24 |
| Voronoi 図を使用しない経路 | 6.83 | 23 | 14.23 |

7 まとめ

本研究では, Voronoi 図を基に車両型ロボットが滑らかに走行できるような経路を生成する手法を提案した. カーブの前後に十分な直線距離が確保できる場合はクロソイド曲線による経路生成が有効である. しかし, クロソイド曲線は曲線の持つ要素により一意的に定まるため, カーブが短い距離で続いている場合, または, 道幅が狭い場合にはクロソイド曲線のみでの経路生成は困難である. そのような場合には Steer を適用すると, 直線距離が短い場合や道幅が狭い場合にも柔軟に対応でき, ϕ が連続的に変化するような経路を生成することができる. これらを組み合わせることによって状況に応じた柔軟な経路の生成が可能である.

謝辞

本研究の一部は, 中央大学 21 世紀 COE プログラム「電子社会の信頼性向上と情報セキュリティ」と文部科学省科学研究費補助金の援助を受けた.

参考文献

- [1] J.A.Reeds, R.A.Shepp. "Optimal paths for a car that goes both forward and backwards," *Pacific Journal of Mathematics* 145 (2): pp.498-502, 1990.
- [2] F.Lamiroux, J.-P.Laumond. "Smooth motion planning for car-like vehicles," *IEEE transactions on robotics and automation* 17 (4): pp.498-502, 2001.
- [3] S.Fleury, P.Soueres, J.P.Laumond, R.Chatila. "Primitives for smoothing mobile robot trajectories," *IEEE transactions on robotics and automation* 11 (3): pp.441-448, 1995.