

自律移動ロボットにおけるポテンシャル法を用いた 安定した経路生成法の開発

Development of Robust Path Planning Algorithm for Autonomous Mobile Robot via Virtual Obstacle

植野健太郎

Kentaro UENO

指導教員 小林一行

法政大学大学院理工学研究科システム工学専攻修士課程

In this paper, we describe the development of a robust path planning algorithm for an autonomous mobile robot. In order to achieve safe navigation under area where obstacles move, the mobile robot has to be controlled by the dynamic path planning algorithm to avoid collision. However, depending on changed by obstacles position, the dynamic path planning algorithm frequently faces to path switching problems. In order to avoid the path switching problems in dynamic path planning algorithm, we newly introduce a virtual obstacle assignment method to suppress events occurred by the path switching problems. The effectiveness of the proposed method is proved by actual mobile robots. The validity of the proposed method is confirmed by both simulation and actual outdoor experiments.

Key Words: *switching, path planning, potential path planning*

1. はじめに

近年、人間の生活環境下で使用される自律移動ロボットの研究は盛んに行われている。例えば、つくばチャレンジ[1]では、歩行者や自転車などが存在するリアルな生活環境下でいかに安全に自律移動ロボットと人間が安全に混在できるのかを実証する実験を行っている。

そうした生活環境下で走行する自律移動ロボットの要素技術は、(1)自己位置推定、(2)環境認識、(3)経路生成の3つにできる。(1)は、GNSS(GPS)、LIDARを使いマップを生成し自己位置推定を行うSLAMがよく使われる。(2)の環境認識は、(1)の自己位置推定に加え、カメラ、LIDARなどの外界センサを用い、障害物と自律移動ロボットの対応関係を認識する処理が行われる。(3)の経路生成は、(2)の環境認識で得られた情報をもとに安全に走行可能な経路を生成する。特に(3)は生活環境下などに見られる多様な障害物の考慮など安全な走行経路選択する必要があるための経路生成アルゴリズムは重要である。

現在よく使われている経路探索アルゴリズムは、グリッドマップを利用した方法や、ポテンシャル場を利用した方法がある。グリッドマップを利用した方法には、走行可能経路をグリッドマップ化し、障害物を避けた最短経路を導くA*探索法[2]や事前に取得した地図を格子状に分割し、各セルに重み付けを行うことで評価基準を決定し、経路生成するWaterfront法[3]などがある。これらの方法は、ヒューリスティック探索の一種であるため、障害物の配置によっては、適切な経路生成ができない場

合がある点や、計算量が多いなどの欠点がある。

一方、ポテンシャル場を利用した方法では、走行グリッドマップ上にポテンシャル場を設定し、目標となる地点が最小値ポテンシャルとなる勾配ベクトルより経路生成を行うポテンシャル法がある。この方法は、障害物を含む走行環境でも障害物からの斥力ポテンシャル場を用いることにより、合理的に障害物回避をおこなうことができる[4][5]。この方法の計算量は少なく、リアルタイム性を重視する自律移動ロボットの経路生成では、優れている。しかし、ポテンシャル法では、ポテンシャル場によって経路が決まるため、移動ロボットの移動方向を考慮しない経路を生成してしまい、複数の極小点により複数の経路が生成されてしまうことがあるなどの欠点がある。

我々研究グループでは、アメリカで行われている自律移動ロボット大会IGVC[6](Intelligent Ground Vehicle Competition)でリアルタイム性に優れたポテンシャル法を車両に実装し使用した。IGVC2014のAuto-Nav challengeでは、この方法を用いて4位の成績を収めることができたが完走はできなかった。完走できなかった理由の一つに障害物検出ができていないにも関わらず、経路生成がうまく行かず障害物に衝突してしまうことがあった。これは、移動走行中に観測される障害物の微妙な位置のずれによって生成されるポテンシャル場がずれ、サンプリングごとに大幅に経路が変更されてしまったことによる。

そこで本論文では、ポテンシャル法をリアルタイムで

使う場合に生じる経路変更の問題点に着目し、安定した走行をするための方策として、仮想障害物を導入し経路生成を安定化させる手法を提案し、提案手法を実験的に検証する。

2. ポテンシャル法を用いた経路生成

ポテンシャル法では、引力ポテンシャルと、斥力ポテンシャルの 2 種類のポテンシャル関数からポテンシャル場を生成する。引力ポテンシャルは目標地点から受ける引力、斥力ポテンシャルは環境情報マップから得られた障害物位置情報から遠ざかるから斥力である。目標地点の近くに障害物が存在する場合や、幅が狭い通路が存在する場合でも移動経路を生成することが可能である。Fig.1 にポテンシャル法で生成した移動経路の具体例を示す。点は障害物示し、実線は生成した移動経路を示す。

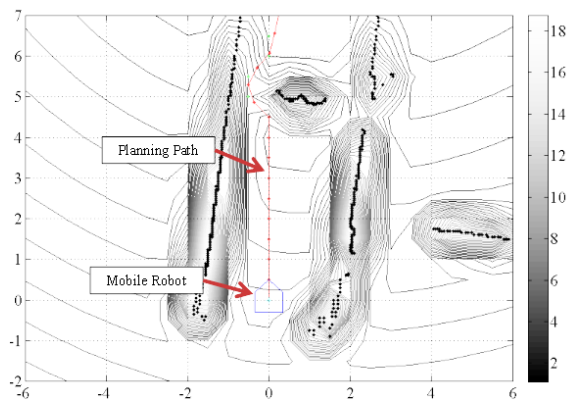


Fig.1 Generated path by using potential field method

3. 仮定と問題の記述

ポテンシャル法は、障害物などにより通路の狭くなった場合でも安定して経路生成できる利点がある。一方、目標地点までの引力ポテンシャルと障害物から離れる斥力ポテンシャルを用いているために二つの合力が同じ場所が複数ある場合、上述したように局所解となる同一ポテンシャルの場所が複数できてしまうことがある。本論文では、IGVC 大会での走行環境[7]を想定し、移動ロボットに実装する際のポテンシャル法の経路生成問題を考える。

(1) 前方に等間隔の障害物がある場合

自律移動ロボットが走行中、複数の障害物を検出したとき、その微妙な障害物の配置の見え方の変化により生成されるポテンシャル場が変化し、安定した経路生成ができなくなる。Fig.2 にそのよう場合を想定した模擬環境を示す。

廊下の真ん中に置かれた障害物は、左右の障害物（壁）から等距離にあり、どちらも通過可能な状況である。センサの精度が一定であるならば、どちらかに確定できるが、センサの出力の誤差や、移動ロボットの位置など複合的な要因で、経路生成にブレが生じやすい。



Fig.2 Typical obstacles position that induces obstacle collision

Fig.2 の実験環境で、移動ロボットの進行方向を僅かに右に回しただけで別経路を生成している。生成した走行経路を Fig.3 に示す。

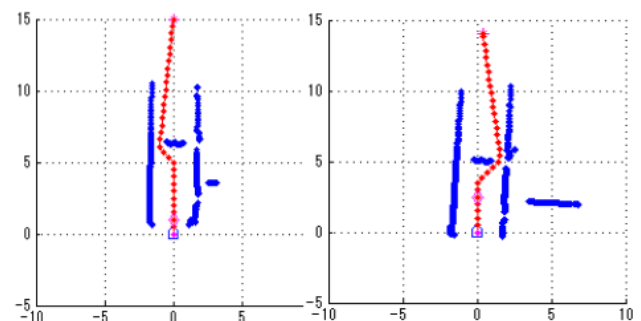


Fig.3 Path planning results at slightly different viewing from mobile robot

Fig.4 に Fig.2 の実験環境で実際に移動ロボットの自律走行を行ったときのポテンシャル法による制御ステアリング角度とサンプリング時間の関係を示す。デットレコニングによる LIDAR の観測位置のずれと目標地点の関係の補正を行い、ポテンシャル場の生成を行っているが、それに関わらず、サンプリング毎に制御ステアリング角度が変化してしまい、結果として障害物に接触してしまう。

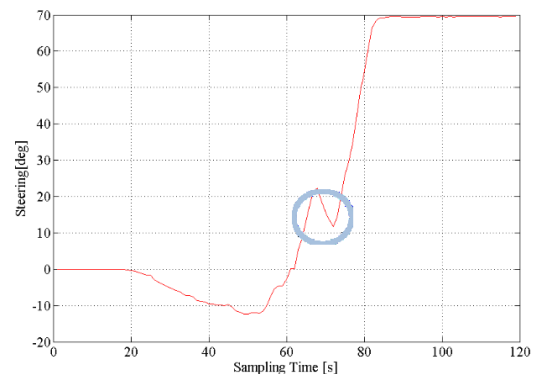


Fig.4 Time history of steering angle, when collision was occurred to obstacle

(2) 後方に経路生成されてしまう場合

ポテンシャル法は、移動ロボットの移動方向を考慮しているわけではないため、自律移動ロボット前方の障害物が複数ある場合、Fig.5 が示すように移動ロボットの後方に経路生成されることがある。これは前方の斥力ポテンシャル場が高くなり、通過できないと判断し、斥力値の低い後方に経路生成しようとする働きのためである。

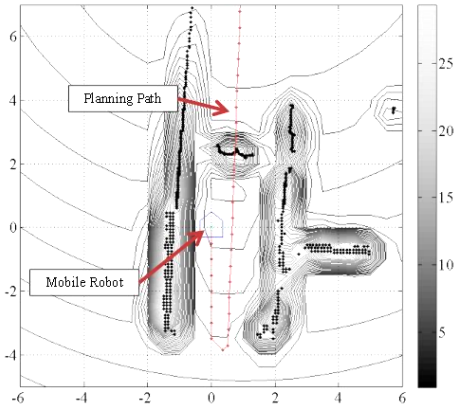


Fig.5 Path planning result, when path is generated backward direction

以上の問題を以下のように整理できる。

- P1) どのように、前方に存在する障害物に対し、経路を生成するのか
- P2) どのように、誤った後方への経路の生成を防ぐのか

4. 提案する仮想障害物を使用したポテンシャル法

以下、問題点 P1), P2)の解決策を検討する。上述のようにポテンシャル法は、検出された障害物の場所や方向により移動ロボットに不適切な経路生成を行う場合があるため、新たに仮想障害物を導入しこれら2つの問題発生を防ぐ。

Fig.6 に提案するアルゴリズムの概要を示す。ポテンシャル場により経路生成の適切化を図るため、後方には、移動ロボットの走行方向を考慮し、急な後方への経路生成を防ぐための半円状の仮想障害物を置く。LIDAR から得られた障害物情報をもとに前方に複数の経路が生成される状況と判断した場合には、1つの経路が生成されるように仮想障害物を配置する。

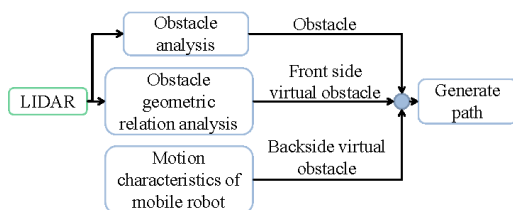


Fig.6 Schematic diagram of proposed virtual obstacle assignment

(1) 経路生成時に発生するブレの対策

Fig.3 に示すように、ポテンシャル法により得られた経路が、サンプリング毎に異なる経路が生成した場合を検出する。Fig.7 にブレを検出する場合の対応関係を示す。

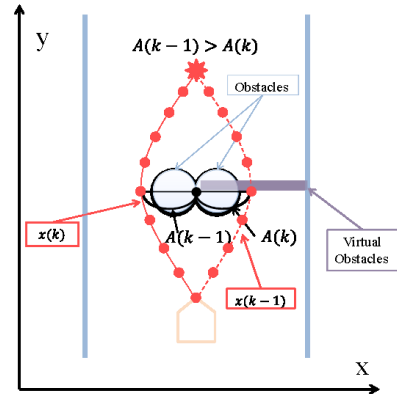


Fig.7 Path planning results (k and $k-1$ Sampling)

生成経路は、障害物付近を迂回する経路が選ばれるため、障害物付近の差が大きくなる。そこで生成経路の障害物付近の経路座標を比較し角度のブレが大きくなる前に未然に検出する。ロボットの中心を原点とし、 $X-Y$ 座標系の (x, y) とする。サンプリング k 毎に原点から目標地点までの n 点の経路点を生成する。サンプリング毎の x, y 経路点の集まりを $xy(k)$ とする。

$$xy(k) = \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} x(n) \\ y(n) \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

サンプリング $k, k-1$ に得られた経路点の集まり、 $x(k), x(k-1)$ のそれぞれの点群の差のユークリッド距離を比較し、その差を積分した $S(k)$ の値によりブレを判断する。

$$S(k) = \sum \|x(k) - x(k-1)\| \quad (2)$$

またブレがあると判断した場合、仮想障害物を設置し、1つの経路生成を行うようにする。 $x(k), x(k-1)$ のどちらを選択するかは障害物の配置から安全な経路を選択する。(3)式のように $x(k)$ と $x(k-1)$ の差分の絶対値をとり、その差分の絶対値がもっとも大きい経路点の y 座標を決める。決定した y 座標に存在する障害物の中点から生成経路点までの距離をそれぞれ $A(k), A(k-1)$ とし、短い方の経路生成点を含む経路を防ぐように仮想障害物を設置する。

$$\Delta S(k) = \max(\|x(k) - x(k-1)\|) \quad (3)$$

(2) 後方に生成する経路に対する対策

Fig.5 に示すように障害物配置によって自律移動ロボッ

トの後方に経路が生成される場合がある。この問題を解決するためロボット後方のポテンシャル場を前方より大きくさせる。そこで Fig.8 に示すようにロボットを中心とした半円状の仮想障害物を障害物のデータと合わせ、常に設置する。自律移動ロボットが回避行動を十分できる間隔を空けるため、半円状の仮想障害物の半径は自律移動ロボットの全長の 2 倍程度とした。

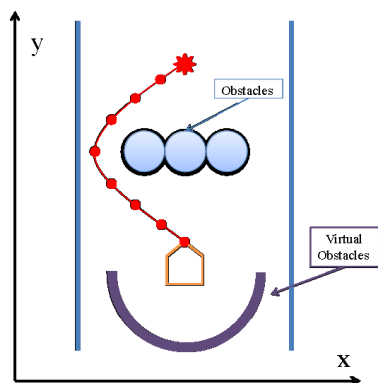


Fig.8 Procedure of backside virtual obstacle assignment

本研究で提案する手法は、経路アルゴリズムを大幅に変更する必要がないので、他の経路生成法にも容易に応用できる。また経路生成段階でブレの検出をするので早い段階での検出が可能となり、従来手法よりもリアルタイム性に優れる。

5. 実験

Fig.9 に今回実験に使用した自律移動ロボットを示す。YAMAHA 社製電動車いす「Active」に IGVC 用に自律走行機能を搭載させたものである[8]。自律移動ロボットには進行角度センサとしてジャイロ、速度センサとして 2 つの車輪速度計、障害物を検出するレーザー距離計 (LIDAR) を搭載している。センサから得られたデータは Laptop-PC で解析・処理・制御する。

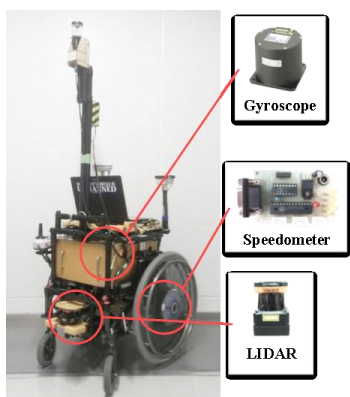


Fig.9 Developed autonomous mobile robot 「Active2014」

提案する仮想障害物を使用した手法を製作した自律移動ロボットに実装して実験する。Fig.10 に自律移動ロボ

ットがブレた際の $S(k)$ の時系列データを示す。生成された経路がブレる程に $S(k)$ が大きくなるため、振幅が大きい時刻の場所でブレが大きい。そこでブレを判断する基準として誤検出を減らすためにヒステリシストリガを用い、連続して振幅が 120 を超えるときブレしていると判断する。仮想障害物はある程度の斥力ポテンシャルを持たせるために横の長さを 2(m)、0.5(m) の厚さの仮想障害物を形成する。また、後方に設置する仮想障害物の半径は自律移動ロボットの全長の 2 倍である 2(m) とした。

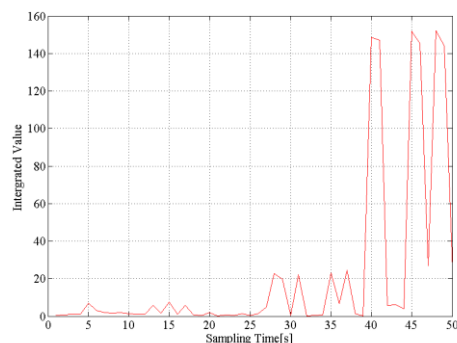


Fig.10 Time history of $S(k)$

(1) 提案した想定環境による実験

実験環境は Fig.2 で示した障害物配置にしたときのデータを Fig.11 に経路生成の際にブレを検出し、仮想障害物を設置する手法を搭載させた結果を示す。

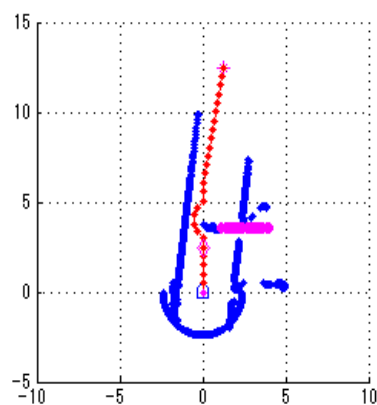


Fig.11 Experimental result that generate virtual obstacles (front and rear side)

Fig.11 が示すように、提案する手法は経路のブレを検出し仮想障害物を設置することが確認できた。これにより生成された経路はブレを無くすることが可能となった。

また Fig.12 に制御ステアリング角度、時系列を示す。Fig.12 から分かるように円の囲まれている箇所ではブレを検出し、その後制御ステアリング角度が安定していることが確認できる。

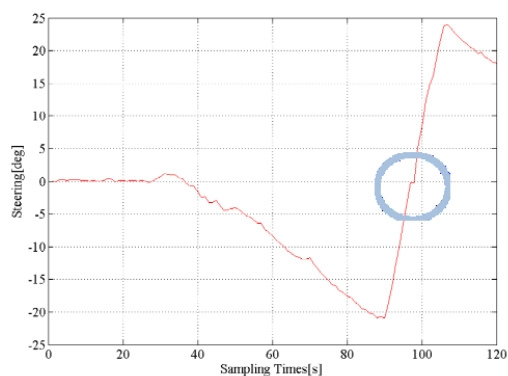


Fig.12 Time history of steering angle, when virtual obstacle was assigned to avoid switching problem

つぎに Fig.13 にはポテンシャル場の図を示す。この図から自律移動ロボット後方に半円状の仮想障害物があるため後方の斥力値が高くなり、前方にあるべき経路が後方に生成されず、前方に生成されるようになっている。

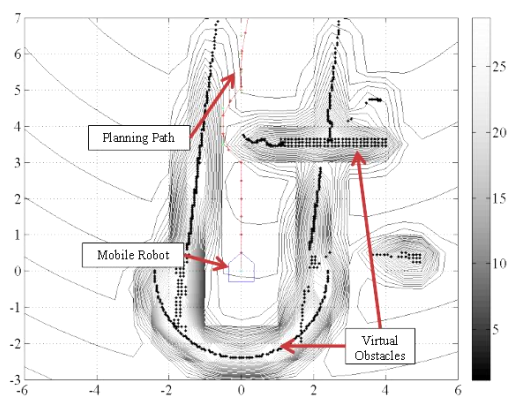


Fig.13 Backside virtual obstacle

これらの実験結果から想定した環境では提案する手法が有用であることが確認できた。

(2) IGVC 環境による実験

想定した環境では提案する手法の有用性が確認できたので、つぎに IGVC でのコースで実験を行う。IGVC 環境での実験する環境は Fig.14 が示す IGVC の走行コース内にある地点とする。楕円で囲んだ地点は白線と白線の間の中央付近に障害物が設置されているためブレが生じる。



Fig.14 IGVC course

提案したシステムを用いて自律移動ロボットを走行させ、楕円に囲まれた地点の経路生成を Fig.15 に示す。

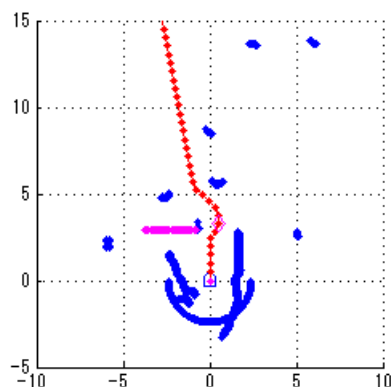


Fig.15 Path planning (IGVC course)

Fig.15 に示すように、実機での実験でもブレを検出し、仮想障害物を設置することができ、経路を安定させることができた。

6. おわりに

本研究では移動走行中に観測される障害物の微妙な位置のずれによって経路が大幅に変更され、ブレてしまう現象を想定し、ブレを検出し、仮想障害物を置くことにより経路を安定させた。結果として経路生成は仮想障害物によりブレることなく生成された経路通りに安定した走行を実現できた。

仮想障害物の設置は経路生成アルゴリズムを大幅に変更する必要がない。そのためポテンシャル法だけではなく他の経路生成アルゴリズムでも容易に適用できると考えられる。また実際の走行軌跡を利用する従来手法ではなく経路生成時にブレの検出を行うので早い段階で補正することができ、リアルタイム性に優れている。

参考文献

- 1) Yuta.S, An open experiment of mobile robot autonomous navigation at the pedestrian streets in the city Tsukuba Challenge, IEEE Mechatronics and Automation, pp.904-909, 2011.
- 2) P.E. Hart, N.J. Nilsson and B. Raphael, A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, IEEE Trans. on SSC, pp/100-107, 1968.
- 3) Steven M. La Valle, Planning algorithms, Cambridge university press, 2006.
- 4) D. H. Kim and S. Shin, Local path planning using a new artificial potential function configuration and its analytical design guidelines, Advanced Robotics, pp.115-135, 2006.
- 5) Yamakawa.T, Development of path planning algorithm using potential field based on two fixed-angle laser scanners, SICE Annual Conference, pp.892-895, 2010.

- 6) Zulkili, Autonomous ground vehicle design, integration and control for the IGVC Competition, 8th ISMA, pp.1-6, 2012.
- 7) Marija Seder and Ivan Petrovic, Dynamic window based approach to mobile robot motion control in the presence of moving obstacles, ICRA, pp.1986-1991, 2007.
- 8) Takahashi.K, Development of laser range finder-implemented JAUS-compliant local pose component, SICE Annual Conference, pp.634-639, 2012.