

移動ロボットにおけるポテンシャル法を用いた経路計画問題の研究

システム情報学専攻 修士2年 鈴木 智晴
指導教員 新 誠一助教授
平成 18 年 2 月 6 日

本論文ではポテンシャル法を用いた二次元平面での経路計画問題を理論的に扱う方法について研究した。経路計画問題にポテンシャル法を用いる多くの研究は経験則に基づいてポテンシャル関数のパラメータを調整しており、パラメータの設定に関する理論的な考察が不十分であった。そこで我々は、経験則に依らず理論的にパラメータを設定するための方法を研究した。またより実環境に近づけるべく、従来考慮されていなかった慣性を導入した経路計画問題にもその理論を拡張した。

1 研究の背景

自律移動ロボットの経路計画において、ポテンシャル法を用いた方法が広く研究されてきた [1]-[3]。ポテンシャル法を用いた経路計画ではゴールからは引力、障害物からは斥力を受けるポテンシャル関数を設計する。設計されたポテンシャル関数の最急降下方向にロボットを移動させれば、移動ロボットは障害物を避けながらゴールに到達出来る。

しかしゴール近傍に障害物が位置する場合、障害物からの斥力が大き過ぎればロボットはゴールに到達出来ない。この問題は斥力の大きさを小さくすれば解決されるが、逆に小さ過ぎるとロボットが障害物と衝突してしまう。このように斥力の大きさのパラメータにはトレードオフの関係があるため、適切に設定されなければならない。ところが多くの研究においてポテンシャル関数のパラメータは経験則に基づいて調整されるため、設定されたパラメータが適切であると理論的に保証されない問題がある。

経験則に依らず理論的にパラメータを設定する方法に関する先行研究として、Kim らの研究 [4] が挙げられる。彼らはロボットがゴールへ到達するための条件と障害物に衝突しないための条件から、斥力の大きさが満たすべき上界と下界を求めた。しかし具体的なパラメータの値は設計者が試行錯誤で設定しなければならず、また一つの障害物しか考慮していないという問題が残っている。

そこで我々は Kim らの理論の問題点を解決し、ポテンシャル関数のパラメータの理論的な設定方法を発展させることにした。

2 ポテンシャル関数の構造

本研究で用いた、Kim らによって提案されたポテンシャル関数の構造を説明する [4]。

ゴールを原点 ($\mathbf{x} = 0$) とし、ゴールによるポテンシャル関数を

$$U^g(\mathbf{x}) = c_g \left(1 - e^{-\frac{\mathbf{x}^T \mathbf{x}}{l_g^2}} \right) \quad (1)$$

で与える。ここで \mathbf{x} は位置ベクトル、 T はベクトルの転置を表す。 c_g , l_g はポテンシャル関数のパラメータで、それぞれゴールからの引力の大きさと拡がり意味する。

j 番目の障害物の座標を \mathbf{o}_j とし、障害物によるポテンシャル関数を

$$U^o(\mathbf{x}) = \sum_{j \in N_o} c_o e^{-\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{o}_j)^T (\mathbf{x} - \mathbf{o}_j)}{l_o^2}} \quad (2)$$

とする。ここで c_o , l_o はポテンシャル関数のパラメータで、それぞれ障害物からの斥力の大きさと拡がり意味する。また N_o は障害物の数を表す。

通常全体のポテンシャル関数は $U(\mathbf{x}) = U^o(\mathbf{x}) + U^g(\mathbf{x})$ で表されるが、 $U(\mathbf{x})$ が $U(0) = 0$, $U(\mathbf{x}) > 0$ ($\mathbf{x} \neq 0$) を満たさない。そこで Kim らは全体のポテンシャル関数を

$$U(\mathbf{x}) = \left(\frac{1}{c_g} U^o(\mathbf{x}) + 1 \right) U^g(\mathbf{x}) \quad (3)$$

と表すことを提案した。

3 パラメータの理論的な設定方法

経路計画問題が満たすべき二つの条件から、ポテンシャル関数のパラメータを理論的に設定する方法を提案する。設定されるパラメータは c_g , c_o , l_g , l_o の四つだが、斥力の大きさのパラメータ c_o 以外を固定することで問題を簡単にする。

時刻 t におけるロボットの位置を $\mathbf{x}_r(t)$ で表し満たすべき二つの条件を定義する。

定義 3.1. 到達条件 : $\|\mathbf{x}_r(t)\|_2 \rightarrow 0$ as $t \rightarrow \infty$

定義 3.2. 衝突回避条件 : $\forall j \in N_o, \forall t \geq 0, \|\mathbf{x}_r(t) - \mathbf{o}_j\|_2 \geq d_c$

d_c を衝突半径と呼ぶことにし、障害物の半径そのものか障害物の半径よりも若干大きめに設定する。ロボットは衝突さえしなければいくら障害物に近づいても問題はないので、衝突半径上を移動することが最も望ましい (図 1)。何故ならロボットが障害物から必要以上に離れて移動すると、二つの障害物間を通過できなくなるといった問題が生じるからである。これにより最適なパラメータの定義を行うことが可能となる。

定義 3.3. ポテンシャル関数の最適なパラメータとは、ロボットが衝突半径上を移動するように設定されたパラメータである。

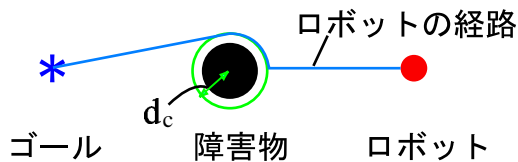


図 1: 理想的なロボットの経路

斥力の大きさ c_o が大きいほどロボットは障害物から離れて移動するので、衝突回避条件を満たした上で c_o を小さく設定すれば最適に近いパラメータ設定となる。

ここでは障害物が二つの場合について (図 2), 衝突回避条件を満たす可能な限り小さい c_o を求める。

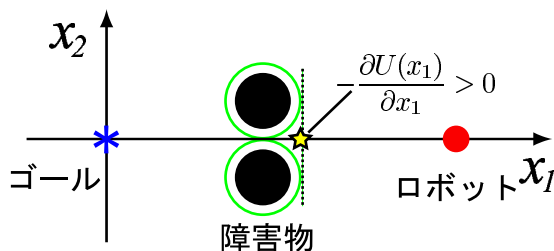


図 2: 障害物が二つの場合の衝突回避条件

図 2 のような障害物の配置の場合、図中の \star の位置でポテンシャル関数の勾配が負となればロボットは障害物と衝突しない。これによって求められた c_o を用いて行ったシミュレーション結果を示す。

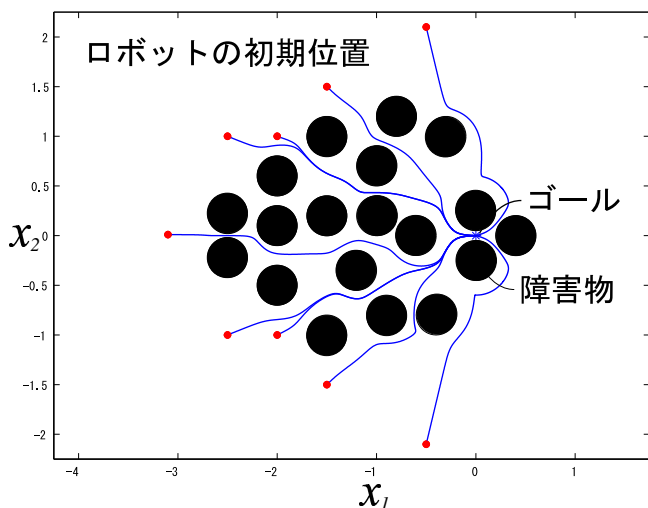


図 3: シミュレーション結果

図 3 において黒丸の半径が衝突半径を表している。ロボットがどの障害物とも衝突することなくゴールに到達できていることが分かる。

4 慣性を考慮した経路計画問題

従来考慮されていなかった慣性を導入した経路計画問題についても研究を行った。

ポテンシャル関数の最急降下方向にロボットを移動させようとしても、実際の移動ロボットは慣性があるので厳密にその方向に移動出来るとは限らない。実環境では慣性が存在するにもかかわらず、理論において慣性を全く考慮しないことは実機への応用上問題となる。そこで我々はポテンシャル法を用いた経路計画問題に慣性を導入することにした。

ポテンシャル場を運動方程式に従って運動する質点を仮定し、その運動に対応させてロボットを移動させることにする。質点には慣性が働くことになるので、ポテンシャル法の理論に慣性を導入することが可能となる。移動ロボットの慣性を実際に扱うのではなく、間接的に扱うことにする。

また力学的エネルギーの保存則から衝突回避条件を求めることが出来ることを示す。そこで求められた条件からパラメータを理論的に設定する方法を提案する。

5 まとめと今後の課題

本研究はポテンシャル法を用いた経路計画問題において、従来経験則に従って設定されたパラメータを理論的に設定する方法を提案した。二つの障害物が存在する場合に、ロボットが障害物と衝突しないための十分条件を求めた。ロボットが最急降下方向へ移動することから、ポテンシャル関数の勾配から障害物と衝突しないためにパラメータが満たすべき条件を導いた。シミュレーションでロボットが障害物と衝突せずにゴールに到達出来ることを確認した。

また従来考慮されていなかった慣性を導入した場合の経路計画問題について研究を行った。ポテンシャル場を運動方程式に従って運動する質点に対応させてロボットを移動させることで、経路計画問題で慣性を扱うことが可能となることを示した。

今後の課題として、ローカルミニマムに陥った時の対処がまず挙げられる。また円形以外の障害物として、凸型の障害物が扱えるように理論を拡張することを考える。

参考文献

- [1] E. Rimon and D. E. Koditschek, Exact robot navigation using artificial potential functions, *IEEE Trans. on Robotics & Automation*, **8**(5), pp. 501-518 (1992).
- [2] Y. Koren and J. Borenstein, Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation, *Proc. of the IEEE int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1398-1404 (1991).
- [3] P. Vadakkepat, K. C. Tan, and M. Wang, Evolutionary artificial potential fields and their application in real time robot path planning, *Congress of Evolutionary Computation*, pp. 256-263 (2000)
- [4] D. H. Kim and S. Shin, Local path planning using a new artificial potential function configuration and its analytical design guidelines, *Advanced Robotics* **20**, pp. 115-135 (2006).