

修正ポテンシャル関数法によるローバーの衝突回避アルゴリズムの提案 Guidance for Collision Avoidance of Rover Using Modified Potential Function Method

○中村祐樹¹, 内山賢治², 増田開²*Hiroki Nakamura¹, Kenji Uchiyama², Kai Masuda²

The potential function method has been widely used to derive real-time guidance laws for vehicles. A critical challenge with this method is the occurrence of stationary points within the artificial potential field. This paper addresses this by proposing a modified potential function for rover collision avoidance. We modify the standard circular potential to effectively eliminate stationary points in the designed field. The proposed modification enhances the conventional potential by introducing a rotated potential field, where the direction of the repulsive velocity rotation is adaptively determined based on the angular relationship among the rover, its target, and obstacles. The validity of the proposed algorithm is verified through numerical simulation.

1. 緒言

無人機の誘導と障害物回避のための経路設計は、安全かつ効率的な運用を支える基盤的課題である。従来、多様な経路設計法が提案されてきたが、中でもポテンシャル関数法^[1]はアルゴリズムの単純さと計算負荷の低さから、リアルタイム経路設計に広く用いられている。しかし、この手法では生成されるポテンシャル場に極小点が生じることがあり、その結果、制御対象が極小点付近で停滞する問題が生じる。特に、障害物が多数存在する災害地のような複雑環境では、この停滞現象が深刻な障害となる。そのため、極小点を回避する方法が提案されているが、十分な成果は得られていない。

本研究では、この問題に対処するため、改良された巡回速度場に基づく修正ポテンシャル関数法を導入し、新たな誘導アルゴリズムを提案する。さらに数値シミュレーションを通じて従来手法と比較し、提案手法の有効性を検証する。

2. ポテンシャル関数法(PF)

本稿では、誘導ポテンシャルを次式で定義する。

$$U_{ste} = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{ste} l^2(\mathbf{x}, \mathbf{x}_g) & l(\mathbf{x}, \mathbf{x}_g) \leq d_g \\ \frac{1}{2} k_{ste} d_g l(\mathbf{x}, \mathbf{x}_g) & l(\mathbf{x}, \mathbf{x}_g) > d_g \end{cases} \quad (1)$$

\mathbf{x} は慣性座標系におけるローバーの位置ベクトル、 \mathbf{x}_g は目標位置ベクトル、 k_{ste} は誘導ポテンシャル係数、 d_g は誘導境界値、 l は目標点とローバー間の距離である。

次に、反発ポテンシャルを次式で定義する。

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{l} - \frac{1}{l_0} \right)^2 l^n, & 0 \leq l \leq l_0 \\ 0, & l > l_0 \end{cases} \quad (2)$$

\mathbf{x}_o は障害物の位置ベクトル、 l_0 は反発ポテンシャルの影響範囲、 n は適応係数、 k_{rep} は反発ポテンシャル係数である。

ローバーを目的地へ誘導するための指令値は、(1)式と(2)式で生成される人口ポテンシャル場の勾配場場を用いて算出する。まず、勾配場を速度場として扱くと、次式の数ベクトルが得られる。

$$\mathbf{v}_{ste} = \left[-\frac{\partial U_{ste}}{\partial x} \quad -\frac{\partial U_{ste}}{\partial y} \right]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_{rep} = \left[-\frac{\partial U_{rep}}{\partial x} \quad -\frac{\partial U_{rep}}{\partial y} \right]^T \quad (4)$$

上式を用いると、 x 方向及び y 方向の速度指令値 v_x, v_y は、それぞれ以下の式で与えられる。

$$v_x = -\frac{\partial U_{ste}}{\partial x} - \frac{\partial U_{rep}}{\partial x} \quad (5)$$

$$v_y = -\frac{\partial U_{ste}}{\partial y} - \frac{\partial U_{rep}}{\partial y} \quad (6)$$

3. 修正ポテンシャル関数法(Modified PF)

ポテンシャル関数法における停留点問題の解法の一つとして、巡回速度場(RVF)が提案されている。反発ポテンシャルが生成する速度場を、以下の式に基づいて改良し巡回速度場 \mathbf{v}_{rot} を生成する。

$$\mathbf{v}_{rot} = -\mathbf{C} \mathbf{v}_{rep} \cdot \text{sgn}(\sigma) \quad (7)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\sigma = \begin{cases} +1 & \alpha_g - \alpha_i \geq 0 \\ -1 & \alpha_g - \alpha_i < 0 \end{cases} \quad (9)$$

ϕ は反発ポテンシャルが生成する速度場の旋回角度、 α_g は誘導対象の現在位置と目標位置とを結ぶ直線が x 軸正方向となす角、 α_i は誘導対象の現在位置と障害物位

置と結ぶ直線がx軸正方向となす角度である。また、提案手法では、ポテンシャル関数から生成される速度指令値の各方向成分を以下のように定義する。

$$v_x^* = c \cdot \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \quad (10)$$

$$v_y^* = c \cdot \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \quad (11)$$

cは任意定数である。

本稿では、複数の障害物が密集して存在している場合、それらの障害物を一つの仮想障害物として判断する。仮想障害物の位置 \mathbf{x}_{vo} 、半径 r_{vo} 、反発ポテンシャルの影響範囲 l_{vo} はそれぞれ以下の式で定義される。

$$\mathbf{x}_{vo}(x, y) = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \right) \quad (12)$$

$$r_{vo} = l(\mathbf{x}_{vo}, \mathbf{x}_{fo}) \quad (13)$$

$$l_{vo} = 2r_{vo} \quad (14)$$

x_i 及び y_i は仮想障害物を形成している各障害物の位置、 N は仮想障害物を形成している障害物の数、 \mathbf{x}_{fo} は仮想障害物を形成する障害物のうち \mathbf{x}_{vo} から最も離れた位置に存在する障害物の位置である。

4. 数値シミュレーション

本研究では13個の障害物が存在する環境を想定し、提案手法(MPF)、旋回速度場を用いた従来手法(RVF)、従来のポテンシャル関数法(PF)の三手法を比較する。ローバーは質量3[kg]の質点とし、障害物の半径を5[m]とする。

Figure 1よりPFを用いた場合は停留点で停止していることが確認でき、RVFを用いた誘導では障害物に衝突している。一方、MPFを用いた誘導ではすべての障害物を回避して目標位置へ到達していることが確認できる。また、障害物群に接近した場合、Figure 2からRVFでは制御入力が急激に増加しているが、同様の状況においてMPFでは制御入力の急激な変化は生じていない。これは、提案手法が設計者に制御入力の大きさを任意に設定する自由度を与えることで、過大入力の印加を回避しつつ、制御対象に適合した入力を生成可能としているためである。

一方、MPFを用いた誘導では、RVFを用いた場合とは異なり、障害物群を事前に回避する挙動が確認できる。この挙動は、提案手法において複数の障害物を統合して仮想障害物として扱う設定に基づくものであり、その結果、従来手法では見られなかった早期の回避行動が実現されている。したがって、本結果は、提案手

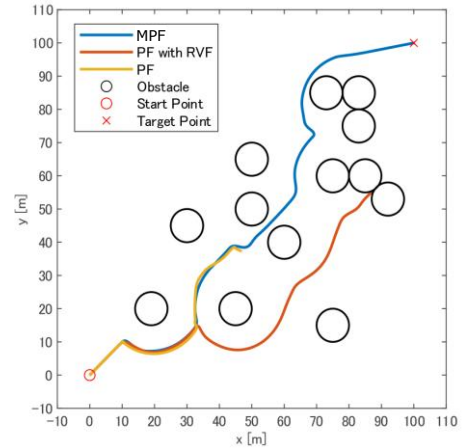


Figure 1. Trajectories of each method

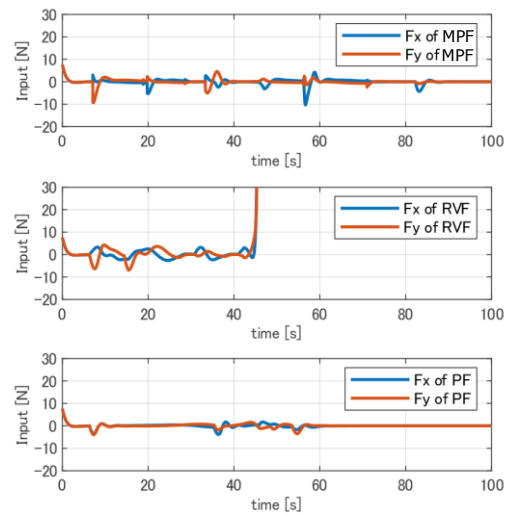


Figure 2. Inputs of each method

法が従来手法と比較して優れた障害物回避性能を有することを示すものである。

5. 結言

本研究では、ポテンシャル関数法における停留点問題に対して新たな誘導法を提案し、数値シミュレーションによりその有効性および従来手法に対する優位性を検証した。今後は、より実環境に近い条件を想定したシミュレーションを実施し、提案手法の有効性をさらに評価する予定である。

参考文献

- [1] Khatib O., "Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 501-503, 1985.
- [2] Yuan Li, et al., "Path Planning Method and Control of Mobile Robot with Uncertain Dynamics Based on Improved Artificial Potential Fields," 2024 IEEE 14th International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems, pp. 524-526, 2024.