

改良型適応ポテンシャル関数法を用いた惑星探査ローバの誘導 Guidance of Exploration Rover using Improved Adaptive Artificial Potential Function Method

○中村祐樹¹, 内山賢治², 増田開²

*Hiroki Nakamura¹, Kenji Uchiyama², Kai Masuda²

The use of exploration rovers is one of the most effective means of planetary exploration. However, rocks and uneven terrain on the planet's surface can create obstacles to the rover's travel. In some cases, it is necessary to reach the target point quickly, so it is necessary to achieve both a short travel time and safe avoidance of obstacles. In this study, Improved Adaptive Artificial Potential Function Method is used to guide the rover to achieve the above two goals. To confirm the effectiveness of the proposed method, the performance of IAAPF and APF are compared by simulation.

1. 緒言

有人探査が不可能な惑星の探査において、ローバの使用は有効な手段の一つとされている。しかし一般に惑星の地表面には岩石等の障害物や不整地が存在し、ローバの走行の障害となる。またミッション内容によっては目標地点に迅速に到着する必要がある場合も存在し、障害物からより距離をとって走行する「安全性」と目標地点へいち早く到達する「迅速性」の二項目を両立させる必要がある。これらの問題に対してポテンシャル関数法(APF)を用いた誘導法が一般的に提案されており、関数のパラメータを厳密に決定することにより「安全性」と「迅速性」をある程度両立することができる。

本研究では前述の二項目をより高いレベルで両立するために改良型適応ポテンシャル関数法(IAAPF)^[1]を用いた誘導法を提案する。また数値シミュレーションによりAPFとの比較を行い、その有効性を検証する。

2. 運動モデル・制御系設計

2. 1. 運動モデル

Figure 1 で示される探査ローバの機体座標系の並進及び回転方向の運動方程式は次式で表される。 m は機体質量、 J は機体の慣性モーメントを表す。

$$m\ddot{x}_b = -R_x \text{sgn}(\dot{x}_b) + (F_r + F_l) \quad (1)$$

$$J\ddot{\theta} = d(F_r - F_l) \quad (2)$$

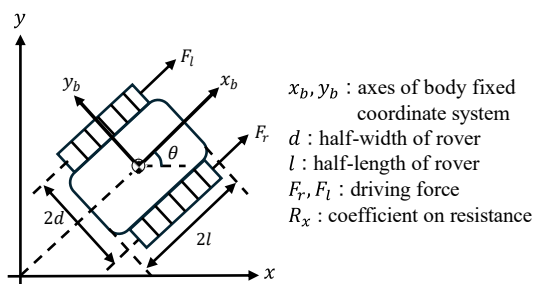


Figure 1. Parameters of Exploration Rover

2. 2. 制御系設計

本研究ではDI法^[2]を用いて運動モデルの線形化を行う。ローバの指令位置を x_c とし、現在位置との誤差 x_e を以下のように定義する。ここで、添え字 e は誤差を表すものとする。

$$x_e = x - x_c \quad (3)$$

(3)式の2階微分を(1)式に代入し非線形項を z_t としてまとめると運動方程式は次式ようになる。ここで x_c は定数値であるためその微分値は0になることに注意する。

$$\ddot{x}_{be} = z_t + \frac{1}{m}(F_r + F_l) \quad (4)$$

非線形項 z_t を打ち消すような推力 U_c を次のように定義する。

$$U_c = (F_r + F_l) = m(-z_t + v_t) \quad (5)$$

v_t は疑似入力であり、(5)式を(4)式に代入することで次の線形状態方程式を得る。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_{be} \\ \dot{x}_{be} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{be} \\ \dot{x}_{be} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_t \quad (6)$$

回転方向の運動方程式に関しても上記と同様の操作を行い、モーメント M_c を次のように定義する。

$$\ddot{\theta}_e = \frac{d}{J}(F_r - F_l) \quad (7)$$

$$M_c = d(F_r - F_l) = Jv_r \quad (8)$$

v_r は疑似入力であり、線形状態方程式は次式のようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_r \quad (9)$$

この線形化でローバの推力は次式のように定義される。

$$F_r = \frac{1}{2} \left(U_c + \frac{M_c}{d} \right), F_l = \frac{1}{2} \left(U_c - \frac{M_c}{d} \right) \quad (10)$$

本研究では疑似入力 v_t, v_r は最適レギュレータを用いて決定する。

3. 改良型適応ポテンシャル関数法 (IAAPF)

3. 1. 誘導ポテンシャル

IAAPF における誘導ポテンシャルは次の式で表わされる。

$$U_{att} = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{att} \cdot l^2(q, q_g) & l(q, q_g) \leq d_g \\ \frac{1}{2}k_{att} \cdot d_g \cdot l(q, q_g) & l(q, q_g) \geq d_g \end{cases} \quad (11)$$

$q(x, y)$ は探査ローバの現在位置, $q_g(x_g, y_g)$ は目標位置, k_{att} は可変誘導ポテンシャル係数, d_g は誘導境界値, l は二点間のユークリッド距離である。(11)式の負の勾配をとり, その値を誘導速度指令値とする。

$$v_{att} = -\nabla U_{att} = \begin{cases} -k_{att} \cdot l(q, q_g) & l(q, q_g) \leq d_g \\ -k_{att} \cdot d_g & l(q, q_g) \geq d_g \end{cases} \quad (12)$$

3. 2. 反発ポテンシャル

IAAPF における反発ポテンシャルは次の式で表わされる。

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{rep} \left(\frac{1}{l(q, q_o)} - \frac{1}{l_0} \right)^2 l^n(q, q_o) & 0 \leq l(q, q_o) \leq l_0 \\ 0 & l(q, q_o) > l_0 \end{cases} \quad (13)$$

k_{rep} は反発ポテンシャル係数, $q_o(x_o, y_o)$ は障害物位置, l_0 は反発ポテンシャルの影響範囲, n は適応係数であり $n > 0$ である。(13)式の負の勾配をとり, その値を反発速度指令値とする。

$$v_{rep} = -\nabla U_{rep} = \begin{cases} v_{rep1} + v_{rep2} & 0 \leq l(q, q_o) \leq l_0 \\ 0 & l(q, q_o) > l_0 \end{cases} \quad (14)$$

$$v_{rep1} = k_{rep} \left(\frac{1}{l(q, q_o)} - \frac{1}{l_0} \right) \frac{l^n(q, q_g)}{l^2(q, q_o)} \cdot \frac{\partial l(q, q_o)}{\partial q} \quad (15)$$

$$v_{rep2} = -\frac{k_{rep}}{2} \left(\frac{1}{l(q, q_o)} - \frac{1}{l_0} \right)^2 \cdot n \cdot l^{n-1}(q, q_g) \cdot \frac{\partial l(q, q_g)}{\partial q} \quad (16)$$

4. 数値シミュレーション

本研究では六個の障害物を回避するシミュレーションを扱う。コントローラには最適レギュレータを用いる。ローバの質量は1 [kg], 障害物の半径は5 [m]であり, 誘導境界値 d_g は5 [m]とする。またローバと最近傍障害物との距離が1 [m]未満の状態を「過接近」とし, この状態は危険であると判断する。Figure 2 より両手法ともに障害物を回避して目標地点へ到達していることが確認できるが, 目標地点到達にかかる時間は APF が172.45秒, IAAPF が37.16秒であり, IAAPF は走行時間を約78%短縮することができる。Figure 4 はローバとローバに最も近い障害物との距離の推移を示しているが, APF では三個の障害物について過接近であると判断できるが, IAAPF では過接近となる場合がないため, IAAPF はより安全に障害物を回避できていると判断できる。

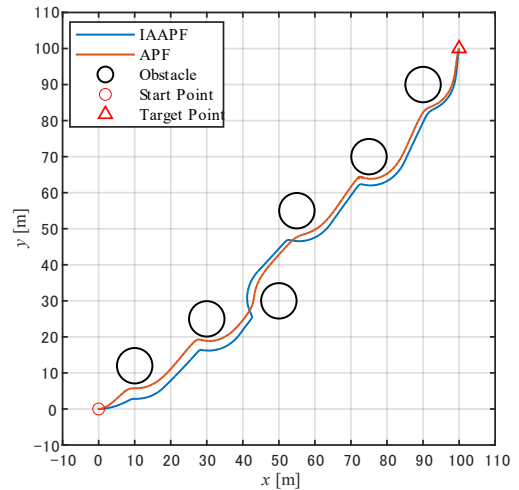


Figure 2. Trajectories of rover

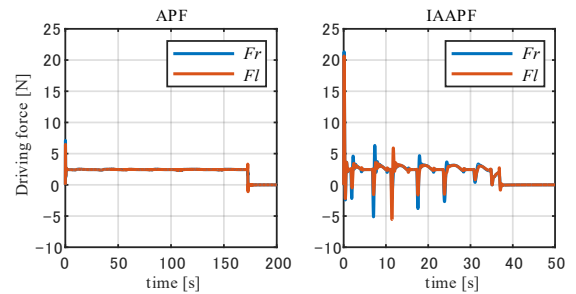


Figure 3. Driving force

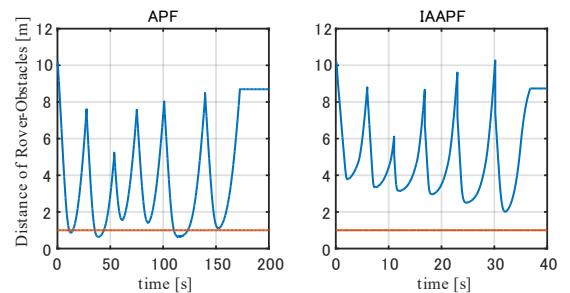


Figure 4. Distance of rover-obstacles

5. 結言

本研究では探査ローバの誘導にIAAPFを用いることで, 走行時間の短縮と障害物の安全な回避の両立を達成, 数値シミュレーションにてAPFに対する優位性を検証した。今後はより複雑なモデルに対して本手法を実装し有効性を検証する。

参考文献

- [1] Yicong Guo, Xiaoxiong Liu, Weiguo Zhang, Xuhang Liu, Yue Yang, "Obstacle avoidance planning for quadrotor UAV based on improved adaptive artificial potential field," IEEE 2019.
- [2] 鈴木優一, 内山賢治, 「不整地の検出と回避を考慮した惑星探査ローバの誘導」, 日本機械学会 関東支部 第23期総会 講演集, p818, 2017