

K7-67

反発ポテンシャル用いた未知環境下における不整地の回避

Detection and Avoidance of Rough Terrain in Unknown Environment Using Repulsive Potential

○千葉壮介¹, 内山賢治², 増田開³*Sousuke Chiba¹, Kenji Uchiyama², Kai Masuda³

This paper describes the guidance and control method for a space rover exploring the unknown planet where the rough area exists. However, the mission of a space rover is interrupted when a space rover fall into this area. To overcome this problem, we apply the DAC observer used to estimate the nonlinear term of the rover's dynamics in order to detect the rough area, and the potential function method to avoid it. The numerical simulation confirmed that a space rover reaches the destination with avoiding the rough area smoothly.

1. 諸言

有人探査不可能な惑星を探索する場合、探査ローバを使用することは有効な手段の一つとされている。しかし、多くの惑星には不整地が存在し、この領域に探査ローバが侵入した場合、探査の継続が不可能となる危険性がある。実際、NASA の探査ローバ spirit は軟弱土壌において車輪がスタックしたことで、ミッションの中断に至った。したがって、走行抵抗の大きい不整地を侵入時に検出し、回避することを目的とした新たな制御系を設計する必要がある。

そこで、本研究では不整地検出に DAC オブザーバ (Disturbance Accomodating Control)²を適用し、不整地回避にポテンシャル関数誘導法を用いた手法を提案し、数値シミュレーションにより、その有効性を検証する。

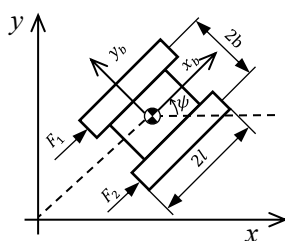
2. 制御対象

2.1 運動方程式

Figure 1 に示す惑星探査ローバの機体座標系の並進・回転運動方程式は、次式のように表される。 m は機体質量、 J は慣性モーメントを表す。

$$m\ddot{x}_b = -R_x \text{sgn}(\dot{x}_b) - (a_1 F_1 + a_2 F_2) + (F_1 + F_2) \quad (1)$$

$$J\ddot{\psi} = b\{(a_1 F_1 - a_2 F_2) - (F_1 - F_2)\} \quad (2)$$



x_b, y_b : axes of body fixed coordinate system
 b : half-width of rover
 l : half-length of crawler
 F_1, F_2 : Driving force
 a_1, a_2 : slip rate
 R_x : coefficient on resistances

Figure 1. Prameters of space rover

2.2 線形化

運動方程式の線形化に DI 法(Dynamics Invarision)¹を適用する。ローバの指令位置を x_c 、現在位置 x との誤差 x_e とすると、誤差方程式は次のように示せる。

$$\dot{x}_e = \dot{x} - \dot{x}_c \quad (4)$$

(4)式を(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のように表される。

$$\ddot{x}_{be} = z_t + \frac{1}{m}(F_1 + F_2) \quad (5)$$

非線形項 z_t を打ち消すような推力 U_c を以下のように定義する。

$$U_c = (F_1 + F_2) = m(-z_t + v_t) \quad (6)$$

ここで、 v_t は(6)式における新たな制御入力と考えられる。また、(6)式を(5)式に代入することで誤差の状態方程式が得られ以下に示す。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_{be} \\ \dot{x}_{be} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{be} \\ \dot{x}_{be} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_t \quad (7)$$

回転の運動方程式に関しても同様の線形化を行い、次式に非線形項 z_r を打ち消すためのモーメント M_c と誤差の状態方程式を示す。

$$\ddot{\psi}_e = z_r - \frac{b}{J}(F_1 - F_2) \quad (8)$$

$$M_c = b(F_1 - F_2) = -J(-z_r + v_r) \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_e \\ \dot{\psi}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_e \\ \dot{\psi}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_r \quad (10)$$

また、この線形化によるローバの推力を次のように定義する。

$$F_1 = \frac{1}{2} \left(U_c + \frac{M_c}{b} \right), \quad F_2 = \frac{1}{2} \left(U_c - \frac{M_c}{b} \right) \quad (11)$$

したがって、新たな推力を決定することによって線形化による誤差を含んだローバの運動を実現することができる。

3. 誘導制御

3.1 不整地検出

本研究では、不整地領域を検出するために DAC オブザーバを使用する。走行抵抗を含む非線形項を以下に示すような 1 次のスプライン関数であると仮定する。

$$z_t = c_1 t + c_2, \quad \dot{z}_t = z_{tt}, \quad \dot{z}_{tt} = 0 \quad (12)$$

このとき、前節で線形化したシステムに対して、推定誤差を含んだ推定値に関するシステムを設計する。そこで、DAC オブザーバを以下のように設計する。

$$\dot{\hat{z}} = \mathbf{A}\hat{z} + \mathbf{B}u + \mathbf{L}(y - \hat{y}) \quad (13)$$

$$\hat{y} = \mathbf{C}\hat{z} \quad (14)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{t1} \\ L_{t2} \\ L_{t3} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad 0]$$

ここで、 \hat{z} は推定値であり、オブザーバゲイン \mathbf{L} は最適レギュレータによって決定する。ローバが不整地領域に進入する際、非線形項の変化は大きいと想定できるため、本研究では、この特性を不整地検出に応用する。

3.2 誘導則

惑星探査ローバを目的地へ誘導及び不整地を回避するために、ポテンシャル関数誘導法を用いる。この手法は、仮想的にポテンシャル場を設計し、その勾配場を例えば速度場に適用することで誘導を行う。通常、ローバの誘導には 2 つのポテンシャル場で構成され、ここでは次式で定義する。

$$U^S(\mathbf{X}_{i,d}) = C_s \sqrt{|\mathbf{X}_{i,d}|^2 + L_s} \quad (15)$$

$$U^R(\mathbf{X}_{i,j}) = C_r \cdot e^{-\frac{\sqrt{|\mathbf{X}_{i,j}|^2}}{L_r}} \quad (16)$$

ここで、 $U^S(x)$ 、 $U^R(x)$ はそれぞれ目標値へ誘導する誘導ポテンシャル関数、不整地を回避するための反発ポテンシャル関数である。 C_s は誘導ポテンシャルの勾配の大きさ、 L_s は平衡点付近の勾配の変化率、 C_r は反発ポテンシャルの勾配の大きさ、 L_r は反発ポテンシャルの影響範囲を示す。

不整地を検出すると、まず反発ポテンシャルがローバ前方に生成され、その後、その頂点の座標をシグモイド関数によって移動させ不整地を回避する。反発ポテンシャルの頂点座標及び使用するシグモイド関数を次式に定義する。

$$x_i = (x + R \cos \psi + 0.1) / f(z_t) \quad (17)$$

$$y_i = (y + R \sin \psi + 0.1) / f(z_t) \quad (18)$$

$$f(z_t) = \frac{1}{1 + e^{-\gamma |z_t|}} \quad (19)$$

3.3 制御則

(6)式及び(9)式で示した入力 v_t 、 v_r には最適フィードバックゲインを用いる。Figure 2 に誘導制御系のブロック線図を示す。

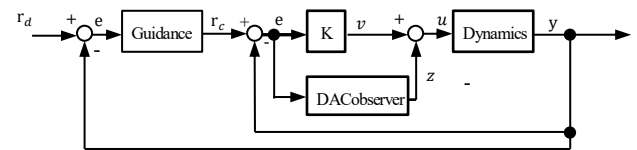


Figure 2. Block diagram of proposed control system

4. 数値シミュレーション

惑星探査ローバの不整地問題に対し、提案手法を適用した。ローバは平面運動するものとし、不整地には抵抗力が変化する領域を設けた。

数値シミュレーション結果を Figure 3 及び Figure 4 に示す。Figure 3 に示される探査ローバの軌跡を見ると、反発ポテンシャルの移動により、不整地を回避して目的地に達していることがわかる。また、Figure 3 の DAC オブザーバによる非線形項 z_t の推定結果を見ると、不整地に侵入する 10 [s] 付近において非線形項の値が急激に変化しており、不整地検出が良好に行なわれていることが分かる。

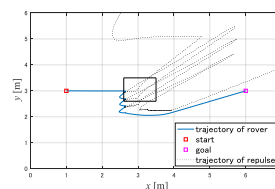


Figure 3. Trajectory

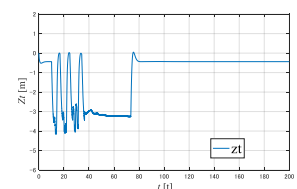


Figure 4. Estimated value

5. 結言

惑星探査ローバの不整地回避の手段として、DAC オブザーバによる不整地検出と反発ポテンシャルを用いた不整地回避の新たな手法を提案した。数値シミュレーションによって有効性を確認した。今後は開発した実機を用いて提案手法の有効性を確認する。

参考文献

- [1] 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, pp818, 2017.
- [2] 羽鳥龍太, 渋谷浩平, 内山賢治: 「走行抵抗を考慮したポテンシャル関数法による惑星探査ローバの誘導」, 宇宙科学連合講演集 関東支部第 23 期総会・講演集, No59, 2015.