K7-82

FastSLAM における反発パーティクルを用いた局所解脱出法

Escaping Local Minima Using Repulsive Particles in FastSLAM for Space Rover

○小池大輝[1]，内山賢治[2]
*Daiki Koike[1], Kenji Uchiyama[2]

This paper presents the efficient strategy for a space rover navigation using estimated position and map acquired by using FastSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) algorithm with a particle filter. A guidance law based on potential function method is also designed to cope with topographical change. The method may result in local minima according to designed potential field. To overcome the problem, we apply a repulsive particle in the filter to escape local minima. Numerical results prove the validity of the proposed method for local minimum problem in comparison with adaptive temperature parallel simulated annealing (ATPSA) method.

１．諸言

地図情報が得られない惑星等において，自己位置推定と地図構築を同時に行う SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）と，計算負荷の少ないポテンシャル関数誘導法を併用する方法は，探査手法として有効な方法の一つとされている．しかし，この誘導則には局所解が存在し，ミッション遂行中に局所解に陥った場合，探査の継続はほぼ不可能となる[1]．この問題を解決するために，著者らは ATPSA (Adaptive Temperature Parallel Simulated Annealing) 法を用いて局所解からの脱出を図ってきた[1]．この方法の問題は，解の探索に膨大な時間を要するため，実機への実装は困難であるという点にある．そこで本稿では，FastSLAM に用いられるパーティクルの与え方に工夫を施し，局所解からの脱出を試みる．最後に，本手法の有効性を数値シミュレーションにより確認する．

２．探査ローバの誘導

2.1　状態遷移方程式

まず，図 1 に示す探査ローバの離散時間状態方程式を次式に示す．

$$\mathbf{X}_R(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{X}_R(k), \boldsymbol{\omega}(k), \mathbf{V}(k)) + \mathbf{e}(k) \tag{1}$$

$$\mathbf{f}\big(\mathbf{X}_R(k), \boldsymbol{\omega}(k), \mathbf{V}(k)\big) = \begin{bmatrix} x_R(k) + t\,V(k)\cos\theta_R(k) \\ y_R(k) + t\;V(k)\sin\theta_R(k) \\ \theta_R(k) + \;t\;\omega(k) \end{bmatrix} \tag{2}$$

ここで，$\boldsymbol{X}_R(k) \in \mathrm{R}^3$ は探査ローバの状態ベクトルを示す．$x_R(k)$，$y_R(k)$，$\theta_R(k)$ は，それぞれ探査ローバの X 座標，Y 座標，姿勢角を示す．$\mathbf{V}(k)$，$\boldsymbol{\omega}(k)$は，それぞれローバの速度，角速度ベクトル，$e(k) \in \mathrm{R}^3$ はプロセスノイズ，t はサンプリング周期を表す．

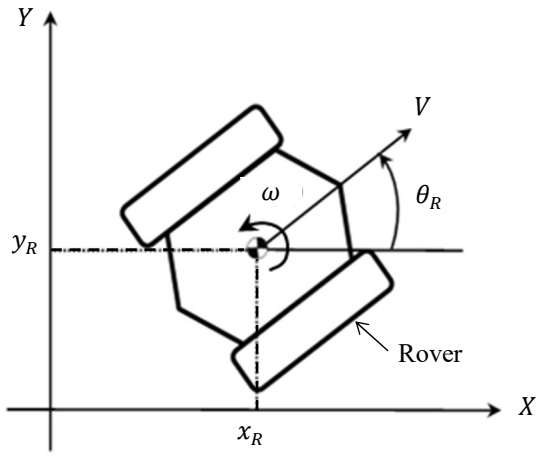

Fig.1 Definition of state variables of space rover

2.2　FastSLAM[2]

FastSLAM は次式のように，自己位置推定と地図構築を分けて確率計算を行う．

$$p(x, m|z, u, c) = p(x|z, u, c)\prod_{k=1}^{N} p(m|x, z, u, c) \tag{3}$$

ここで，xは状態変数，mは地図，zは観測値，cは障害物の特徴量を表す．式(3)の性質より，FastSLAM では，探査ローバの軌跡の推定にはパーティクルフィルタ，障害物の位置推定には低次元の EKF を用いることができる．このように，自己位置推定と地図構築を独立に行うことで，高速な SLAM 計算の実現が可能となる．また，FastSLAM では，パーティクルによる推定誤差の蓄積を抑制するために，適宜，リサンプリングを行う．しかし，過度なリサンプリングはパーティクルが一点に収束し，推定の精度が低下する．この問題を対処するために，本研究では等間隔リサンプリング法を適用する．

１：日大理工・学部・航宇　２：日大理工・教員・航宇

2.3 ポテンシャル関数誘導法

ポテンシャル関数誘導法は，探査領域に人工ポテンシャル場を生成し，障害物を回避しつつ制御対象を目的地へ誘導する手法である．通常，ポテンシャル場 $U(\mathbf{x})$ は誘導ポテンシャル $U^S(\mathbf{x})$ 及び反発ポテンシャル $U^R(\mathbf{x})$ で構成され，ここでは次式で定義する．

$$U^S(\mathbf{x}) = C_S\sqrt{\mathrm{x}^2 + \mathrm{y}^2 + L_S} \tag{4}$$

$$U_j{}^R(\mathbf{x}_j) = C_r \sum_{i \neq j} \exp\left(-\frac{|\mathbf{x}_{i.j}|}{L_r}\right) \tag{5}$$

ここで，添え字 i はローバ，添え字 j は j 番目の障害物を示す．誘導ポテンシャルの勾配の大きさを C_S，平衡点付近の勾配変化率を L_S，反発ポテンシャルの勾配の大きさを C_r，反発ポテンシャルの影響範囲を L_r と定義する．$\mathbf{x}$ はローバの位置ベクトル，$|\mathbf{x}_{i.j}|$は障害物とローバの相対距離を示す．上式で定義したポテンシャル関数の勾配場を速度場に適用，すなわち，$V_X = \partial U/\partial X$, $V_Y = \partial U/\partial Y$ とすることで，速度及び姿勢角に関する誘導則が得られる．

$$V_d = \sqrt{V_X{}^2 + V_Y{}^2} \tag{6}$$

$$\theta_d = \tan^{-1}\left(\frac{V_Y}{V_X}\right) \tag{7}$$

３．局所解脱出方法

3.1　ATPSA[2]

ATPSA 法は SA(Simulated Annealing)法に対して，解の受理率が 50%になるよう改良したもので，いずれの方法も物質の温度とエネルギ準位の関係を応用したものである．ATPSA 法により得られた解は，探索空間内に与えられた関数の大域的最適解に対して良い近似を与えることから，局所解から脱出するために本手法を利用することがある．実際，探査ローバに ATPSA 法を適用し，数値シミュレーションにより，その有効性が検証されている[1].

3.2　反発パーティクル

目的地へ誘導されている探査ローバが局所解に陥ったと判断したとき，ローバの状態推定に使用しているパーティクルの期待値 μ をローバ前方へ $\Delta\mu$ だけ移動させる．また，パーティクルの分散 σ^2 の値も探査ローバと障害物との平均相対距離に応じて $\Delta\sigma$ だけ変化させる．以下に，局所解近傍におけるパーティクルの分布を示す．

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_a{}^2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu_a)^2}{2\sigma_a{}^2}\right\} \tag{8}$$

ここで $\sigma_a{}^2 = (\sigma + \Delta\sigma)^2$ は局所解近傍におけるパーティクル散布時の分散を表し，$\mu_a = \mu + \Delta\mu$は散布する位置の平均位置である．式(8)に従って散布されたパーティクルを反発パーティクルとし，各パーティクルに反発ポテンシャルを持たせる．探査ローバの前方にこの反発パーティクルを散布することで，探査ローバは局所解を脱出することが可能となると考えられる．

４．数値シミュレーション

探査ローバの局所解問題に対して，ATPSA 法と提案する手法を適用した．それぞれの結果を図 2 及び図 3 に示す．図 2 に示される探査ローバの軌跡を見ると，局所解近傍で複雑な動きをしており，目的地に到達するまで 334[s]かかっている．一方，図 3 に示す探査ローバの軌道を見ると，無駄の少ない動きをしており，68[s]で目的地に到達している．今回の数値シミュレーションにより，局所解脱出法として用いられる ATPSA 法に比べ，反発パーティクルを利用した本手法の方が，より短時間で局所解を脱出することが可能となることが分かった．

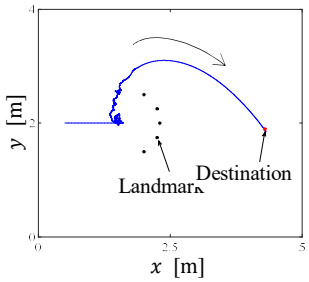

Fig.2 Using ATPSA

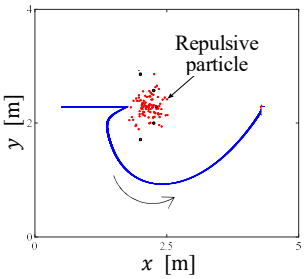

Fig.3 Using repulsive particle

５．結言

惑星探査ローバの目的地誘導における局所解脱出問題に対して，FastSLAM におけるパーティクルを反発ポテンシャルとする新たな手法を提案し，数値シミュレーションにより有効性を確認した．今後は，得られた解の最適性を評価するとともに，提案する手法を実機に適用し，その有効性を検証する．

参考文献

[1] 澁谷浩平，内山賢治：ATPSA を適用したポテンシャル関数誘導法による惑星探査，宇宙科学技術連合講演会講演集，JSASS-2014-4473，2014.

[2]坂井敦，齊藤哲平，黒田洋司：FastSLAM アルゴリズムにおける Unscented 変換を利用したサンプリング手法，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集，1A1-E12，2009.