

# 複数の経路計画問題における確率的ロードマップ法の性能評価

## Performance Evaluation of a Probabilistic Roadmap Method for Multi-query Path Planning Problems

○遠藤肇\*, 佐藤真俊\*, 米澤直晃\*

○ Hajime Endo\*, Masatoshi Sato\*, Naoaki Yonezawa\*

\*日本大学

\*Nihon University

キーワード: 経路計画 (path planning), 確率的ロードマップ法 (probabilistic roadmap method), RRT (rapidly-exploring random tree), ロボット工学 (Robotics)

連絡先: 〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1 日本大学 工学部 情報工学科 知能情報処理研究室  
米澤直晃, Tel.: (024)956-8827, Fax.: (024)956-8863, E-mail: yonezawa.naoaki@nihon-u.ac.jp

### 1. はじめに

ロボット工学における経路計画とは、物体が初期位置姿勢から目標位置姿勢まで障害物にぶつかることなく、最短距離または何らかの評価関数を最適化した経路を計画する問題である。経路計画法のひとつである、勾配法によって探索を行うポテンシャル法<sup>1)</sup>や、探索木を用いて探索を行うRRT (Rapidly exploring Random Tree)<sup>2)</sup>は、単一の初期位置姿勢と目標位置姿勢の組み合わせに対して経路を計画する強力な手法である。一方、環境に多数の通過点を配置する確率的ロードマップ法<sup>3)</sup>は、複数の初期位置姿勢と複数の目標位置姿勢の組み合わせからなる複数の経路を計画する問題を一括して解くことが可能な手法である。しかしながら、これまで確率的ロードマップ法と関連する手法の評価には、ノード数や計算時間、経路生成の成功率が利用される<sup>1)</sup>一方で、複数の問題を解く性能に関する定量的な指標はなかった。

本論文では、確率的ロードマップ法について複数の問題を解く性能に関する指標を提案するとともに、その指標に基づく新たな確率的ロードマップ法を提案し、数値実験により有効性を検証する。

### 2. 確率的ロードマップ法

#### 2.1 構築ステップ

確率的ロードマップ法とは、環境の通過点の候補となるノードをランダムに生成し、ノード同士を結合して障害物と干渉しないエッジからなるグラフ構造 (ロードマップ) を構築し、ロードマップからダイクストラ法などにより、最適路を探索する手法である。

確率的ロードマップ法におけるロードマップを構築するステップは構築ステップと呼ばれ、アルゴリズムをAlgorithm 1に示す。本アルゴリズムでは、まず空集合のノードの集合 $N$ とエッジの集合 $E$ を用意する。次に自由空間にランダムなノード $c$ を繰り返し配置し、ノードの集合 $N$ に

---

**Algorithm 1: Probabilistic Roadmap Method**

---

```
1:  $N \leftarrow \emptyset$ 
2:  $E \leftarrow \emptyset$ 
3: loop
4:    $c \leftarrow$  a random configuration
5:    $N_c \leftarrow$  a set of candidate neighbors
      of  $c$  chosen from  $N$ 
6:    $N \leftarrow N \cup \{c\}$ 
7:   for all  $n \in N_c$ , in order of increasing
       $D(c, n)$ 
8:     if !collision( $(c, n)$ ) then
9:        $E \leftarrow E \cup \{(c, n)\}$ 
```

---

---

**Algorithm 2: Expand Step**

---

```
1: loop
2:    $c \leftarrow$  a node selected
      by probability  $w(c)$  from  $N$ 
3:    $step \leftarrow 0$ 
4:    $e \leftarrow$  a vector of norm  $L$ 
      in random direction
5:   while  $step < step_{MAX}$  do
6:      $n \leftarrow$  a node shifted by  $e$  from  $c$ 
7:     if !collision( $(c, n)$ ) then
8:        $N \leftarrow N \cup \{n\}$ 
9:        $E \leftarrow E \cup \{(c, n)\}$ 
10:     $step++$ 
11:     $c \leftarrow n$ 
12:   else
13:     $e \leftarrow$  a vector of norm  $L$ 
      in random direction
```

---

追加する。ノード $c$ が配置されるたび、ノードの集合 $N$ からノード $c$ との距離が $d_{max}$ よりも近い最大 $m_{max}$ 個のノードの集合 $N_c$ を抽出し、 $N_c$ のすべての要素 $n$ とノード $c$ との接続が成功するたび、エッジの集合 $E$ にエッジ $(c, n)$ を追加する。

## 2.2 拡張ステップ

Kavrakiらは、狭い空間へもロードマップを広げるために、ロードマップの拡張ステップを提案している<sup>3)</sup>。拡張ステップのアルゴリズムをAlgorithm 2に示す。拡張ステップでは、ノードの集合 $N$ の中から確率 $w(c)$ に従ってノードを

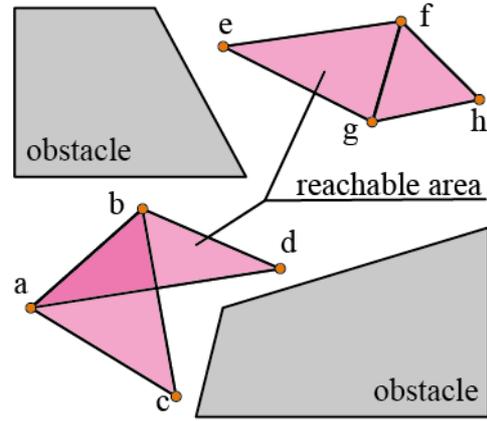


Fig. 1 ロードマップと到達可能領域.  
Roadmap and Reachable Area.

選出し、ランダムバウンズウォーク<sup>4)</sup>により新たなノードとエッジを追加する。ここで、確率 $w(c)$ は(1)式により与えられる。

$$w(c) = r_f(c) / \sum_{a \in N} r_f(a) \quad (1)$$

ここで、 $r_f(c)$ は故障率であり、(2)式で表される。

$$r_f(c) = f(c) / (n(c) + 1) \quad (2)$$

ここで、 $n(c)$ は $c$ についてエッジの生成を試みた回数、 $f(c)$ はその失敗回数を表す。

## 3. 複数の経路計画問題のための評価指標

本論文では、2次元平面上を全方向に移動するロボットの経路計画問題を対象とする。なお、ロボットは大きさを持たない点として扱うものとする。

3つのノードを頂点とする三角形が環境の障害物と干渉せず、その三角形の内側にロボットが配置されるとき、ロボットは3つのノードへ移動可能なことが保証される。本論文ではこのような三角形が占める領域の和集合を到達可能領域と呼ぶこととする。この到達可能領域の面積が大きくなればなるほど、複数の経路計画問題に対応できると考えられる。

Fig. 1に構築ステップにおける到達可能領域の

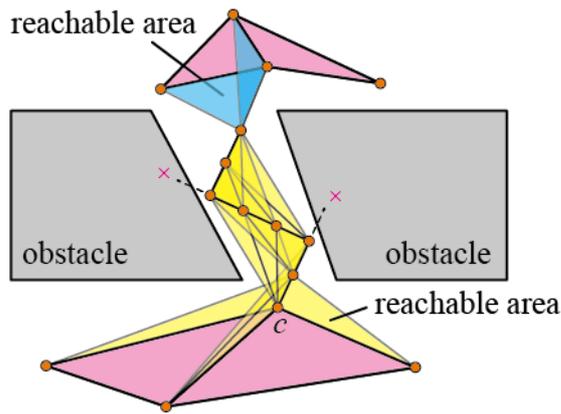


Fig. 2 拡張ステップと到達可能領域.  
Expand Step and Reachable Area.

定義を示す。構築ステップにおける到達可能領域は3つのノードとそれらを接続する3つのエッジにより形成される三角形の和集合と定義する。本論文では新たなエッジを追加するたびに、ノード $c$ およびノード $n$ 、これらに共通に隣接するノードから形成される三角形に接続されたノードにより三角形を形成する。

Fig. 2に拡張ステップにおける到達可能領域の定義を示す。拡張ステップでは、ランダムバウンスウォークの軌跡をエッジとして扱う以外に、バウンド前とバウンド後のノード同士の間にもエッジによる接続を環境と干渉しない限り行う。そして、構築ステップと同様に3つのノードとそれらを接続する3つのエッジにより形成される三角形の和集合と定義する。

#### 4. 評価指標に基づくロードマップの構築

本論文では到達可能領域を積極的に広げるよう、ロードマップの構築ステップと拡張ステップに新たに変更を加える。まず、構築ステップにおいて、自由空間にノードを生成する際、既存の到達可能領域内にノードが生成された場合は、ノードの生成をやり直すことで、常に到達可能領域外に新たなノードが追加されるようにする。同様にして拡張ステップにおいても、ランダムバウンスウォークが既存の到達可能領域に侵入した場合もバウンドを行う。これにより

常に到達可能領域外に新たなノードが追加される。

#### 5. 数値シミュレーション

本論文では、従来手法と提案手法とで生成するノードの数と到達可能領域の面積を比較することで、提案手法の有効性を検証する。作業空間の広さは $48\text{m} \times 48\text{m}$ であり、障害物を除くと自由空間の面積は $2134\text{m}^2$ である。また、確率的ロードマップ法のパラメータを以下のように与えた。

$$d_{max} = 5 \text{ m} \quad (3)$$

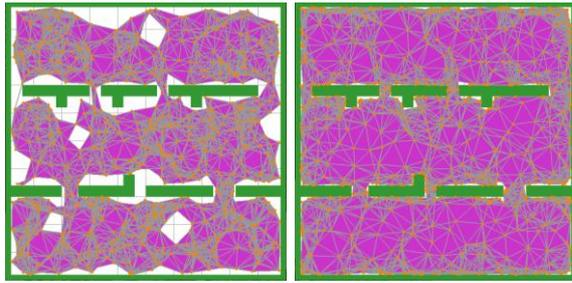
$$m_{max} = 10 \quad (4)$$

$$L = 1 \text{ m} \quad (5)$$

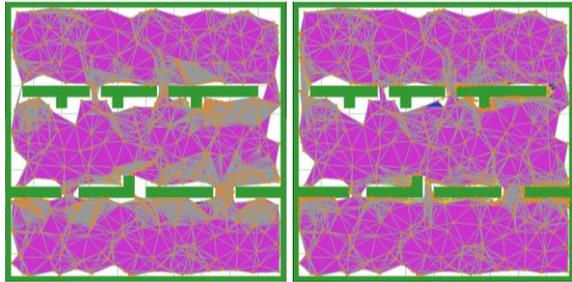
$$step_{max} = 5 \quad (6)$$

本実験では、提案手法と従来手法を比較するために（ア）従来手法の構築ステップのみで700ノード生成した場合、（イ）提案手法の構築ステップのみで700ノード生成した場合、（ウ）提案手法の構築ステップで400ノード生成した後、従来手法の拡張ステップで300ノード生成した場合、（エ）提案手法の構築ステップで400ノード生成した後、従来手法の拡張ステップで300ノード生成した場合を比較する。

Fig. 3に各シミュレーション条件により生成されたロードマップと到達可能領域を、Fig. 4にノード数の増加に対する到達可能領域の面積を推移を示す。Fig. 3, Fig. 4より、（ア）従来手法の構築ステップのみの場合と比べて（イ）（ウ）（エ）の場合は、ほぼ同程度の面積の到達可能領域を生成できることが確認できる。Fig. 4より、（イ）提案手法の構築ステップのみの場合はノード数が増加するにつれて、到達可能領域の面積の増加量は鈍化するものの、（ウ）（エ）の場合と比べて安定して増加している。（ウ）（エ）の拡張ステップを用いる場合は、到達可能領域の面積が大きく増加したり、ほとんど変



(ア) 従来の構築ステップのみ (イ) 提案手法の構築ステップのみ



(ウ) 従来の拡張ステップを利用 (エ) 提案手法の拡張ステップを利用

Fig. 3 シミュレーション結果. Simulation Result.

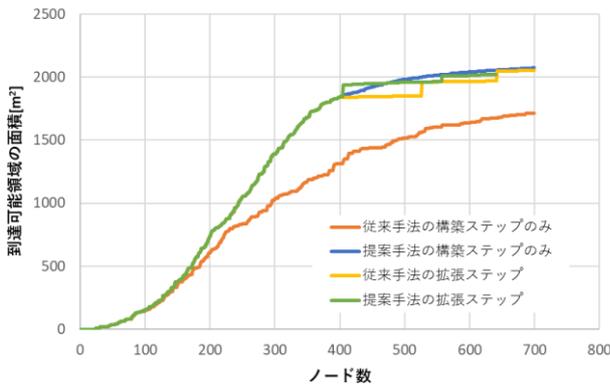


Fig. 4 ノード数と到達可能領域の面積. Number of Nodes and Area of Reachable Area.

化しない状態が継続される様子が観察できる。これは、拡張する元のノードやそのノードから拡張する方向が確率によって決定されるため、不適当なノードや方向が選択されてしまったためと考えられる。

## 6. まとめ

本論文では、確率的ロードマップ法について複数の問題を解く性能に関する指標として、互いにエッジによって接続された3つのノードを頂点とする三角形の和集合を到達可能領域として定義し、その面積で性能を評価することを提案した。また、到達可能領域に基づいて確率的ロードマップ法の改良手法を提案した。最後に数値実験によりその有効性を確認した。

## 参考文献

- 1) O. Khatib. " Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 500-505, 1985.
- 2) S. M. LaValle. " Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning," Technical Report (TR 98-11). Computer Science Department, Iowa State University, 1998.
- 3) L. E. Kavraki, P. Svestka, J. C. Latombe and M. H. Overmars, "Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-dimensional Configuration Spaces," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 12, no. 4, pp. 566-580, 1996.