

旋回運動を利用した長尺物体の搬送とその動作計画

Transportation of a Long Object using Pivoting Motion and its Motion Planning

○松本翔吾*, 大竹一輝*, 米澤直晃*

○ Shogo Matsumoto*, Kazuki Otake*, Naoaki Yonezawa*

*日本大学

*Nihon University

キーワード: 物体搬送 (object transportation), 動作計画 (motion planning),
確率的ロードマップ法 (probabilistic roadmap method), 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

現代社会において、重量物体の効率的な搬送は多く産業で重要な課題である。ロボット工学の分野では、物体の一部を設置させたまま、その接地点を回転軸として物体を旋回運動 (Pivoting) させることで、ロボットが重量物体を小さな力で移動する技術が注目されている。

旋回運動により物体を移動させるためには、周囲の環境に干渉させず、また目標の位置姿勢正確に移動できるように、接地点を切り替える時期と旋回角度を計画する必要がある。これまで大型物体を移動させるための動作計画法¹⁾が提案されているが、不連続に接地点を変更しながら旋回運動する物体に関する動作計画の研究は少なく、効率よく最適な動作を探索する手法の確立が課題である。

本論文では、Fig. 1に示すようにロボットが鉄骨のような細い長尺物体をその片端を持ち上げて旋回させて任意の位置姿勢へ移動させる物体搬送を対象とし、その動作を確率的ロ

ードマップ法²⁾に基づいて計画する動作計画法を提案する。具体的に、長尺物体の位置と姿勢を3次元の状態変数で表し、コンフィギュレーション空間に多数の長尺物体のノードをランダムに配置する。互いに近くに存在する長尺物体の2つのノード同士を3度の回転運動によって表されるエッジによって接続する。最後に本動作計画法の有効性をシミュレーションによって検証する。

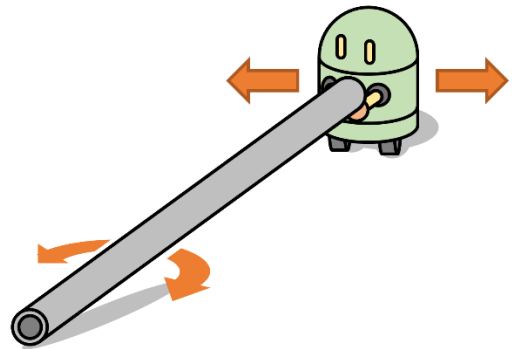


Fig. 1 旋回運動を用いた長尺物体の搬送.
Transportation of a Long Object using Pivoting Motion.

Algorithm 1: Probabilistic Roadmap Method

```

1:   $G.N \leftarrow \emptyset$ 
2:   $G.E \leftarrow \emptyset$ 
3:  while  $G.N.size() < N_{MAX}$  do
4:     $n \leftarrow a \text{ random configuration}$ 
5:    if !collision( $n$ ) then
6:       $G.N \leftarrow G.N \cup \{n\}$ 
7:   $G.N \leftarrow G.N \cup \{s, g\}$ 
8:  for all 2-combinations of a set  $G.N$ 
      as  $n_1, n_2$  do
9:    if Distance( $n_1, n_2$ ) then
10:   if !collision( $(n_1, n_2)$ ) then
11:      $G.E \leftarrow G.E \cup \{(n_1, n_2)\}$ 
12:  return dijkstra_path( $G, s, g$ )

```

2. 確率的ロードマップ法

本論文では、長尺物体の中心の位置と姿勢をノードとし、作業空間全体へ確率的にノードを配置する。確率的ロードマップ法に基づいて動作計画法を設計する。確率的ロードマップ法の疑似コードをAlgorithm 1に示す。

ここで、 G はグラフ構造、 $G.N$ はグラフ構造のノードのリスト、 $G.E$ はグラフ構造のエッジのリストを表している。はじめにグラフ構造 G は空で初期化される。次にノードのリスト $G.N$ が N_{MAX} 個になるまでノード n を追加する。ノード n は状態量をランダムに与えて生成され、collision関数により周囲の環境を干渉しないことが確かめられた場合のみノードのリスト $G.N$ に追加される。さらにスタート地点の状態のノード s と目標地点の状態のノード g がノードのリスト $G.N$ に追加され、これらのノードの組み合わせ n_1, n_2 についてエッジの生成を試みる。Distance関数を用いて、一定の距離より近いノードの組み合わせエッジしか生成しないよう制限する。またcollision関数によりノード n_1 からノード n_2 へ移動する際に周囲の環境を干渉しないことが確かめ、その場合のみエッジ (n_1, n_2) がエッジのリスト $G.E$ に追加される。最後にdijkstra_path関数によりダイクストラ法を用い

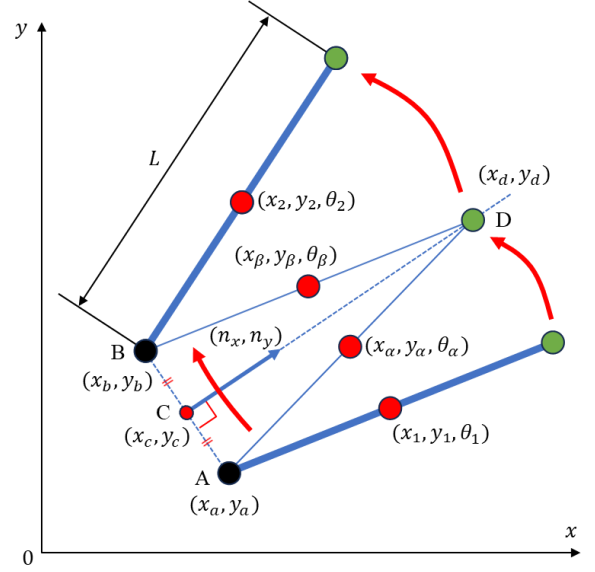


Fig. 2 長尺物体の状態と2状態間の移動.
State Variables of Long Objects and Motion between Two States.

てスタート地点 s から目標地点 g への最短経路が求められる。

3. 旋回運動する長尺物体の動作計画法

確率的ロードマップ法に基づいて旋回運動する長尺物体の動作計画法を次のように設計する。

3.1 ノードの設計

長尺物体の状態の定義をFig. 2に示す。ここで、 L は長尺物体の長さ、 (x, y) は長尺物体中心の位置、 θ は長尺物体と x 軸の成す角度である姿勢を表す。本手法において各ノードの状態は (x, y) と θ によって表され、ノードを生成する際は x, y, θ が確率的に与えられる。以後、ノードの状態を (x, y, θ) と表す。

3.2 エッジの設計

ノード (x_1, y_1, θ_1) とノード (x_2, y_2, θ_2) の間を補間する動作を設計する。Fig. 2に示すように、長尺物体の各状態の端点AとB、および、これら2点の垂直二等分線上の点Dを軸として、長尺物体を旋回させて、ノード (x_1, y_1, θ_1) からノード

(x_2, y_2, θ_2) へ移動させる。

具体的に、点Aの座標 (x_a, y_a) と点Bの座標 (x_b, y_b) 、およびこれらの中点Cの座標 (x_c, y_c) は以下となる。

$$(x_a, y_a) = \left(x_1 - \frac{L}{2} \cos \theta_1, y_1 - \frac{L}{2} \sin \theta_1\right) \quad (1)$$

$$(x_b, y_b) = \left(x_2 - \frac{L}{2} \cos \theta_2, y_2 - \frac{L}{2} \sin \theta_2\right) \quad (2)$$

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{x_a + x_b}{2}, \frac{y_a + y_b}{2}\right) \quad (3)$$

点Aと点Dの距離は L であることから点Dの座標 (x_d, y_d) は以下となる。

$$(x_d, y_d) = (x_c + L_2 n_x, y_c + L_2 n_y) \quad (4)$$

ここで、 (n_x, n_y) および L_2 は以下のように表される。

$$(n_x, n_y) = \left(\frac{y_b - y_a}{\sqrt{(y_b - y_a)^2 + (x_a - x_b)^2}}, \frac{-x_b + x_a}{\sqrt{(y_b - y_a)^2 + (x_a - x_b)^2}}\right) \quad (5)$$

$$L_2 = \sqrt{L^2 - \{(x_a - x_c)^2 + (y_a - y_c)^2\}} \quad (6)$$

回転軸を切り替える状態 $(x_\alpha, y_\alpha, \theta_\alpha)$ と $(x_\beta, y_\beta, \theta_\beta)$ は以下のように求められる。

$$(x_\alpha, y_\alpha) = \left(\frac{x_a + x_d}{2}, \frac{y_a + y_d}{2}\right) \quad (7)$$

$$\theta_\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y_d - y_a}{x_d - x_a}\right) \quad (8)$$

$$(x_\beta, y_\beta) = \left(\frac{x_b + x_d}{2}, \frac{y_b + y_d}{2}\right) \quad (9)$$

$$\theta_\beta = \tan^{-1} \left(\frac{y_d - y_b}{x_d - x_b}\right) \quad (10)$$

以上より、 (x_1, y_1, θ_1) と $(x_\alpha, y_\alpha, \theta_\alpha)$ を補間する状態 (x, y, θ) は媒介変数 t を用いて以下のように表される。

$$\theta = t\theta_\alpha + (1-t)\theta_1 \quad (11)$$

$$(x, y) = \left(x_\alpha + \frac{L}{2} \cos \theta, y_\alpha + \frac{L}{2} \sin \theta\right) \quad (12)$$

同様に、 $(x_\alpha, y_\alpha, \theta_\alpha)$ と $(x_\beta, y_\beta, \theta_\beta)$ を補間する状態 (x, y, θ) は以下のように表される。

$$\theta = t\theta_\beta + (1-t)\theta_\alpha \quad (13)$$

$$(x, y) = \left(x_\beta - \frac{L}{2} \cos \theta, y_\beta - \frac{L}{2} \sin \theta\right) \quad (14)$$

$(x_\beta, y_\beta, \theta_\beta)$ と (x_2, y_2, θ_2) を補間する状態 (x, y, θ)

は以下のように表される。

$$\theta = t\theta_2 + (1-t)\theta_\beta \quad (15)$$

$$(x, y) = \left(x_\beta + \frac{L}{2} \cos \theta, y_\beta + \frac{L}{2} \sin \theta\right) \quad (16)$$

3.3 エッジの生成条件

提案手法では、式(6)右辺が0または虚数とならないために、以下の不等式が成り立つときはエッジを生成しないものとする。

$$\sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \geq 2L \quad (17)$$

本式は点Aと点Bが長尺物体の2倍の長さよりも離れている場合にエッジを生成できないことを表している。

3.4 エッジの重みの定義

本研究における長尺物体の運動はすべて旋回運動で表されるため、ダイクストラ法のためのエッジの重み w を以下のように旋回角度の和で表すものとする。

$$w = |\theta_\alpha - \theta_1| + |\theta_\beta - \theta_\alpha| + |\theta_2 - \theta_\beta| \quad (18)$$

4. シミュレーション

提案する動作計画法により長尺物体を旋回させて任意の位置姿勢へ移動させる動作が生成できるか確かめる。また生成された動作について考察する。

本実験では長尺物体の長さを $L = 1\text{m}$ としたFig. 3に検証のための作業空間と長尺物体の初期位置姿勢と目標位置姿勢を示す。長尺物体の初期位置姿勢 s と目標位置姿勢 g を以下のように与えた。

$$s = (-2.0[\text{m}], -2.0[\text{m}], -\pi[\text{rad}]) \quad (19)$$

$$g = (2.0[\text{m}], 2.0[\text{m}], 0.0[\text{rad}]) \quad (20)$$

ノード (x, y, θ) は以下の範囲で一様乱数に従って生成した。

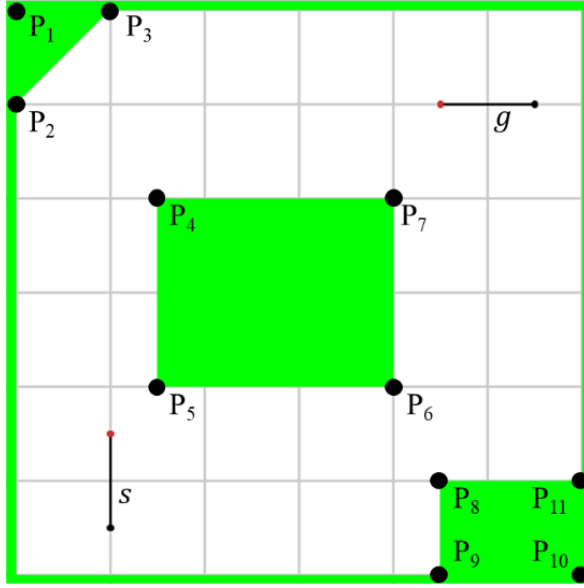


Fig. 3 作業空間と長尺物体の初期位置姿勢と目標位置姿勢. The Workspace and Initial and Target Position and Orientation of Long Objects.

$$-3.0[\text{m}] \leq x \leq 3.0[\text{m}] \quad (21)$$

$$-3.0[\text{m}] \leq y \leq 3.0[\text{m}] \quad (22)$$

$$-\pi[\text{rad}] \leq \theta \leq \pi[\text{rad}] \quad (23)$$

作業空間の障害物の頂点の座標を以下のよう
に与えた.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{P}_1 = (-3.0[\text{m}], 3.0[\text{m}]), \quad \mathbf{P}_2 = (-3.0[\text{m}], 2.0[\text{m}]), \\ \mathbf{P}_3 = (-2.0[\text{m}], 2.0[\text{m}]), \mathbf{P}_4 = (-1.5[\text{m}], 1.0[\text{m}]), \\ \mathbf{P}_5 = (-1.5[\text{m}], -1.0[\text{m}]), \mathbf{P}_6 = (1.0[\text{m}], -1.0[\text{m}]), \\ \mathbf{P}_7 = (1.0[\text{m}], 1.0[\text{m}]), \mathbf{P}_8 = (1.5[\text{m}], -2.0[\text{m}]), \\ \mathbf{P}_9 = (1.5[\text{m}], -3.0[\text{m}]), \mathbf{P}_{10} = (3.0[\text{m}], -3.0[\text{m}]), \\ \mathbf{P}_{11} = (3.0[\text{m}], -2.0[\text{m}]) \end{array} \right. \quad (24)$$

提案手法を用いて $N_{\text{MAX}} = 50$ 個のノードを配置し、ダイクストラ法により求めた長尺物体の最小の旋回動作をFig. 4に示す. Fig. 4より、遠回りすることなく、初期位置姿勢から目標位置姿勢への長尺物体の動作が生成されていることがわかる. また、生成された動作は周囲の障害物と干渉していないことがわかる.

5. おわりに

本論文では、ロボットが鉄骨のような細い

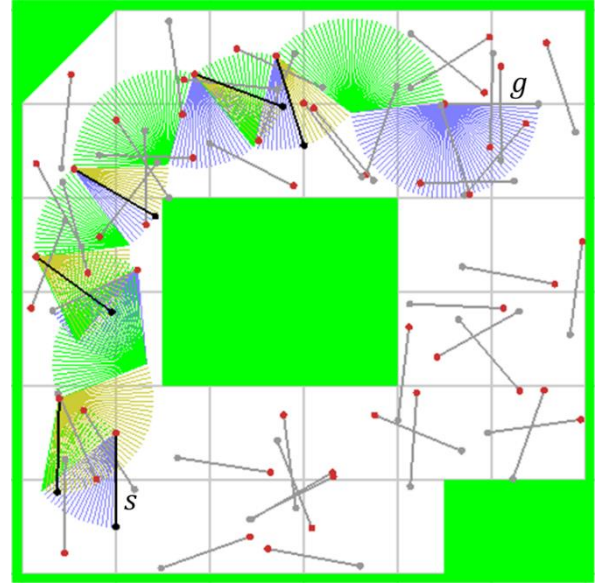


Fig. 4 シミュレーション結果. Simulation Result.

長尺物体をその片端を持ち上げて旋回させて任意の位置姿勢へ移動させる物体搬送を対象とし、その動作を確率的ロードマップ法に基づいて計画する動作計画法を提案した. 提案する動作計画法は、長尺物体の位置と姿勢を3次元の状態変数で表し、コンフィギュレーション空間に多数の長尺物体のノードをランダムに配置する. そして、互いに近くに存在する長尺物体の2つのノード同士を3度の回転運動によって表されるエッジによって接続する手法であった. 最後に本動作計画法により初期位置姿勢から目標位置姿勢まで、作業空間に干渉することなく、長尺物体が移動可能な旋回動作を生成できることが確かめられた.

参考文献

- 1) Kensuke Harada. "Manipulation Planning for Large Objects through Pivoting, Tumbling, and Regrasping," Applied Sciences 11, no. 19: 9103. <https://doi.org/10.3390/app11199103>, 2021.
- 2) 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.