

ポテンシャル法における停留問題に対する 距離スケールングを用いた斥力調整に関する一考察

Distance-Scaling Based Repulsive Potential Adjustment for Avoiding Stagnation in Potential Field Navigation

松田 和輝¹ 中嶋 洸介¹ 植村 渉^{1*}
Kazuki Matsuda¹, Kosuke Nakajima¹, and Wataru Uemura¹

¹ 龍谷大学
¹ Ryukoku University

Abstract: This paper proposes a distance-scaling method for repulsive potential adjustment to resolve the local minimum problem in potential field-based path planning. The method dynamically normalizes the spatial scale based on the relative distance between the robot, the obstacle, and the goal. Numerical simulations demonstrate that the proposed approach effectively reconfigures the potential field even in geometrically challenging environments, such as concave obstacles. Consequently, the robot successfully reaches destinations located in close proximity to or behind obstacles without being trapped in local minimal.

1 はじめに

現在の製造業は、第4次産業革命により大量生産から多品種少量生産へと移り変わっている。その中心要素の一つとしてスマートファクトリーと呼ばれる、生産機械や設備を任意に組み合わせることが可能な工場がある。このような工場内における部品や製品の搬送といったタスクに柔軟に対応するために移動ロボットが必要とされる。RoboCup Logistics League(RCLL)は、このような工場内の物流工程を模した移動ロボットの国際競技である。RCLLのフィールド内には、Modular Production System(MPS)と呼ばれる加工マシンが多数存在する。MPSは移動ロボットから部品を受け取り作業を行うため、移動ロボットは、作業対象であるMPSに部品を受け渡すために、その直前まで接近して停止する必要がある。

このような移動ロボットには、障害物を避け、目的地へ到達する経路を計画する必要がある。移動ロボットの代表的な経路計画の一つとして、ポテンシャル法[1]がある。ポテンシャル法は、目的地に引力、障害物に斥力を与え、これらを足し合わせた合力の勾配ベクトルを移動ロボットの進行方向とする。この手法では、目的地を谷、障害物を山とすることで、ボールが転がり落ちるように移動ロボットの進行方向を決めることができる。一般的な経路計画では、目的地は障害物か

ら離れた空間に設定することが多い。RCLLのような工場では、移動ロボットの目的地は加工マシン付近に設定する必要があるが、この時、加工マシンは障害物の扱いになる。この場合、目的地の引力よりも障害物の斥力が大きくなるため、引力側への勾配がなくなり、移動ロボット目的地よりも手前で停留し、目的地への到達が困難となる問題が生じる。

本研究では、この問題に対して、移動ロボットと目的地までの距離に基づき空間の尺度を正規化し、相対的な引力と斥力のバランスを均衡化する距離スケールングという概念を提案する。

2 ポテンシャル法

2.1 概要

ポテンシャル法は、ロボットの移動環境を仮想的なポテンシャルの場として扱う手法である。目的地を対象を引き寄せる引力ポテンシャル、障害物に対象を遠ざける斥力ポテンシャルを設定し、これらのポテンシャルを足し合わせた合成ポテンシャルの勾配ベクトルを計算することで、対象となる移動ロボットの進む方向を導出することができる。合成ポテンシャルが形成される仮想的な地形をポテンシャル場と呼ぶ。ポテンシャル場を可視化した例を図1に示す。この手法では、目的地を谷、障害物を山として扱うことで、ボールが傾

*連絡先：龍谷大学先端理工学部電子情報通信課程
〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷1-5
E-mail: wataru@rins.ryukoku.ac.jp

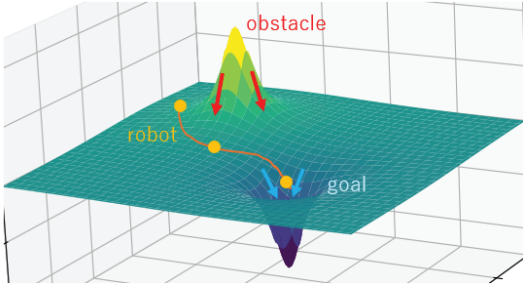


図 1: ポテンシャル場と対象物の移動経路

斜のある地形を転がり落ちるように、ロボットの進行方向を決定する。

2.2 ポテンシャルと勾配ベクトルの計算

この節では、ポテンシャル法のポテンシャルと勾配ベクトルの計算方法について説明する。まず、ロボットの位置を p_{robot} 、目的地の位置を p_{goal} 、障害物の位置を $p_{obs,i}$ 、引力の係数を k_{att} 、斥力の係数を k_{rep} とする。ここで i は i 番目の障害物を表す。斥力の係数と引力の係数は調整可能なパラメータである。ロボットの位置 p_{robot} における引力ポテンシャル関数 U_{att} の式は 1 になる。

$$U_{att} = -\frac{k_{att}}{\|p_{robot} - p_{goal}\|^2} \quad (1)$$

斥力ポテンシャル関数 $U_{rep,i}$ の式は 2 になる。

$$U_{rep,i} = \frac{k_{rep}}{\|p_{robot} - p_{obs,i}\|^2} \quad (2)$$

そのため、引力と斥力の合成ポテンシャル関数 U の式は 3 になる。

$$U = U_{att} + \sum_i U_{rep,i} \quad (3)$$

また、ロボットが受ける力 F の式は 4 になり、ロボットはこの力 F の負の方向に移動する。

$$F = -\nabla U \quad (4)$$

2.3 問題点

ポテンシャル法では斥力と引力の関数を足し合わせた合力の勾配ベクトルからロボットの進行方向を決定する。しかし、目的地が障害物に十分に近い位置に存在する場合、目的地からの引力ポテンシャルよりも、障害物からの斥力ポテンシャルが大きくなることで、目的地側への勾配がなくなりロボットが目的よりも手前で停留する。

表 1: 実験ケースと係数の設定

| ケース | 障害物の種類 | 目的地 |
|-------|---------|-----|
| ケース A | 単一障害物 | 手前 |
| ケース B | 単一障害物 | 奥 |
| ケース C | L 字型障害物 | 奥 |
| ケース D | コの字型障害物 | 奥 |

3 距離スケールを用いた斥力の調整

3.1 概念

前章で述べた問題を解決するため、距離に基づくスケールリングを用いた斥力調整手法を提案する。スケールリングとは、一定の規則に基づき空間の尺度を正規化することである。ロボットから目的地までの距離を基準としスケールリングすることにより、相対的な引力と斥力のバランスを均衡に保つことができる。そこで本手法では、目的地までの距離を基準として空間を正規化する距離スケールリングを提案する。

3.2 斥力ポテンシャルの調整方法

本節では、距離スケールリングを斥力関数に適用する。ロボットから目的地までの距離を d_{goal} 、ロボットから障害物までの距離を d_{obs} とすると、距離スケールリングを考慮した斥力ポテンシャル関数 $U'_{rep,i}$ の式は 5 になる。

$$U'_{rep,i} = \frac{k_{rep}}{\|p_{robot} - p_{obs,i}\|^2} \cdot \min\left(1, \frac{d_{goal}}{d_{obs}}\right) \quad (5)$$

ロボットから目的地までの距離と障害物までの距離の比率を距離スケールリングに用いる。比率は 1 を最大値とする。これにより、障害物よりも目的地に近い場合には、距離比率を用いて算出した斥力を用い、目的地が障害物より遠い場合には、従来の斥力となる。つまり、目的地が遠い場合には従来通り障害物を回避し、目的地が近い場合には、斥力を抑制することで目的地に近づくことができる。

4 実験

4.1 実験方法

本実験では、距離スケールリングを導入した提案法による停留問題への有効性について検証する。数値シミュレーションにより、2次元平面上で斥力を調整しないポテンシャル法と距離スケールリングを導入した提案法での移動ロボットの経路計画を行い、障害物近傍におけ

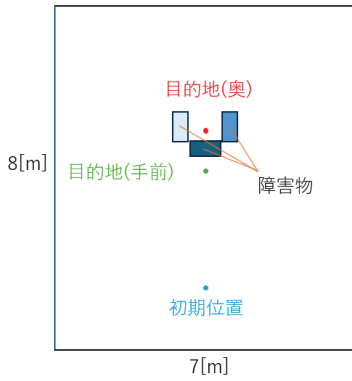


図 2: 実験環境

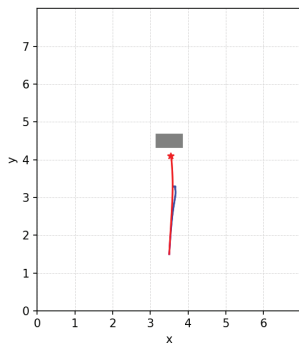


図 3: ケース A での走行経路

る目的地への到達能力と障害物が密集する環境での適応可能性について比較する。本実験では、 7×8 m のフィールドにおいて、表 1 に示す 4 つのケースで検証する。フィールド内の障害物等の配置は、図 2 に示す。目的地が障害物の手前にある場合、ロボットの初期位置 (3.5, 1.5)、目的地 (3.6, 4.1) とし、目的地が障害物の奥にある場合、ロボットの初期位置 (3.5, 1.5)、目的地 (3.6, 4.9) と設定する。ケース A およびケース B では障害物が 1 つのみ存在している環境において、ロボットと目的地および障害物との位置関係による経路の違いについて検討する。ケース C およびケース D は複数の障害物を組み合わせた斥力が重複する環境においての経路の違いについて検討する。

4.2 実験結果

斥力を調整しないポテンシャル法の経路を青色、距離スケールを導入した提案法の経路を赤色とする。ケース A で単一障害物での目的地が手前の場合の経路を図 3 に、ケース B で単一障害物での目的地が奥の場合の経路を図 4 に示す。

ケース C で L 字型障害物での目的地が手前の場合の

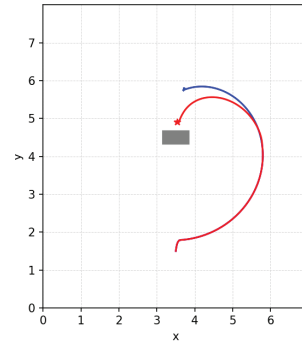


図 4: ケース B での走行経路

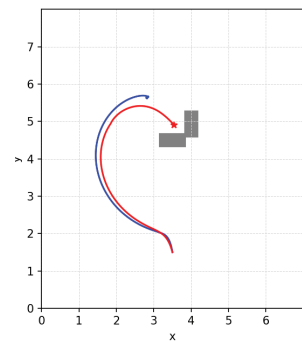


図 5: ケース C での走行経路

経路を図 5 に、ケース D でコの字型障害物での目的地が奥の場合の経路を図 6 に示す。

どのケースにおいても斥力を調整しないポテンシャル法 (青線) では、目的地手前で力が均衡し停留した。一方、距離スケールを導入した提案法 (赤線) では、停留することなく目的地へ到達した。これは、目的地への接近に伴い距離比率が減少することで、相対的に引力が斥力を上回るようポテンシャル場が再構成されたためである。

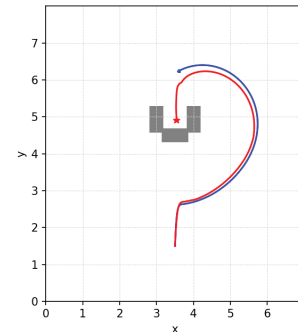


図 6: ケース D での走行経路

5 おわりに

本研究では、ポテンシャル法の目的地付近の障害物による停留問題について、距離スケーリングの概念に基づいて目的地までの距離を基準として空間を正規化するように斥力を調整する手法について検討した。

参考文献

- [1] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots", The Int. J. Robotics Research, vol. 5, no. 1, pp. 90 – 98, 1986.