移動に伴う局所障害物地図の更新の予測による移動ロボットの動作計画

Motion Planning by Predicting Update of Occupancy Gridmap with Moving Path

学 ○菅原 直樹 (東北大学) 正 竹内 栄二郎 (東北大学) 正 大野 和則 (東北大学) 正 田所 諭 (東北大学)

Naoki SUGAWARA Tohoku University sugawara@rm.is.tohoku.ac.jp

Eijiro TAKEUCHI Tohoku University

Kazunori OHNO Tohoku University

Satoshi TADOKORO, Tohoku University

Abstract: This study developed path planning algorithm that mobile robot moves safely. For safety move, it is important for preventing incursion into unmapped region. However, existing path planning algorithm has to invade unmapped space when destination is located in unmapped space. This paper describes about path planning algorithm which minimize incursion into unmapped region by predicting update of unmapped region with action.

1 緒言

現代社会では、保安職、介護職、接客職、農業職などさまざまな分野において、深刻な人材不足となっている。自律移動ロボットはほぼ操縦が不要であり、人間の生活空間でも活動可能であることから、人材不足の問題を解決する科学技術として期待されている。

自律移動ロボットはセンサを用いて観測を行い、観測された情報を基に無駄が少なく安全な経路を生成することが要求される。自律移動ロボットの経路計画には dijkstra 法¹⁾ や A*法²⁾ といった経路計画アルゴリズムが用いられており、その他にも、これらの経路計画アルゴリズムから派生した多くの経路計画アルゴリズムが存在する。

ロボットが安全に走行するためには、ロボットが観測していない未観測領域への侵入を防ぐ必要がある。しかし、従来の経路探索アルゴリズムは、既知の地図や、これまでの動作により観測された領域に基づいて経路探索を行い、移動中の観測状態の変化を考慮していなかった。そのため未観測領域内に目的地がある場合や、現在未観測の領域を通らなければ目的地に到達できない場合は、未観測領域に侵入する危険な経路が生成される可能性があった。

そこで、本研究では未観測領域が観測されることで観測された領域になることを予測した経路計画アルゴリズムを提案する。観測状態の変化を予測し、かつ未観測領域への侵入の危険性に基づくコスト関数を追加することで、周囲の情報が分からない場合でも未観測領域への侵入が最小限で、無駄な行動が少ない行動が可能になると考える。

本稿では、静的未知環境において、未観測領域と観測済領域を区別し、未観測領域への侵入を可能な限り避けつつ、初期位置から目標位置まで観測を行いながら移動可能な経路生成アルゴリズムについて述べる。

2 アルゴリズム

2.1 提案する経路計画手法

本研究のアルゴリズムは、A*法をベースとしている。まず、ロボットが行うことのできる 1 回分の行動を行動パターン (action) と定義する。このアルゴリズムでは図 1 のように初期状態からすべての行動パターンを実行したものを記録し、その行動に基づいてそれぞれの局所障害物地図を更新する。それぞれの行動にかかる時間と、目的地までの距離、未観測領域へ侵入した面積に基づいて移動コストを設定し、その中から最小コストの行動を取り出してその状態から再びすべての行動を行うということを繰り返す。

これを繰り返すことにより、図 2 のように行動パター

ンの組み合わせがツリー状に増え、様々な場所へ移動する行動パターンの組み合わせ (行動セット) が生成されていく。そして行動セットの中で目的地に到達したものを発見し、その行動セットを経路として採用するという手法を用いる。

Fig.1: ロボットの行動

Fig.2: 行動パターンの分岐

2.2 状態と行動パターン

本研究のアルゴリズムでは、対向二輪型の自律移動ロボットを想定し、図 1 に示すように、前進、右旋回、左旋回、後退の 4 つの行動パターンを定義する。前進ではロボットが向いている方向に一定距離移動し、後退ではロボットが向いている方向とは逆方向に一定距離移動する。右旋回、左旋回ではロボットが向いている方向を一定の角度分変化させる。これらの行動パターンを組み合わせ経路を生成する。

ロボットの状態は次の要素で構成される。

- ロボットの位置の x 座標 (position x)
- ロボットの位置の y 座標 (position y)
- ロボットの角度 (angle)
- コスト (cost)

- 観測地図の情報 (map information)
- 地図 id (map id)
- 過去の行動の情報 (way information)

各行動セットには id が割り振られており、id ごとに情報を管理する。

拡張により新しい行動セットが生成された場合は、情報が入っていない id を探して情報を入れる領域を確保する。

拡張済みの行動セットや、障害物に侵入している行動セットについては、情報を捨て、id をフリーにする。

2.3 ロボットの形の表現

まず、ロボットの形を地図上に表現する必要がある。ロボットの位置の x 座標 (position_x)、ロボットの位置の y 座標 (position_y) が回転中心となる。図 RobotPosition のようにこの位置を原点としたローカル座標においてロボットの各頂点の座標を決め、その点を結ぶことでロボットの形を表現している。ロボットが向きを変えた場合でも、ローカル座標におけるロボットの各頂点の座標に回転行列を乗ずることにより、向きの変化を表現することが可能である。

次に、得られたロボットの形の内部に侵入不可領域が含まれていないことを確認する必要がある。この方法として、これまで頂点とそれを結ぶ辺で表現されてきたロボットの形を局所障害物地図と同じグリッドで表現し、ロボットが占有するグリッドと、侵入不可領域のグリッドが重なった場合、衝突していると判定を行う方法を採用した。

2.4 観測と地図表現

上述したように、本研究のアルゴリズムにおいては、特徴である観測領域を考慮した行動計画を実現するため、各行動セットに、その状態での観測領域を記録した地図の情報を持たせる必要がある。この地図を観測地図と呼ぶ。

観測地図には、侵入可能領域、侵入不可領域、未観測領域、未観測侵入不可領域の 4 つの領域を定義する。これらの領域を記録するため、図 4 のように地図をグリッドに分割し、各グリッドの情報を、侵入可能領域ならば 0、侵入不可領域ならば 1、未観測領域ならば 2、未観測だが障害物があることを知っている領域ならば 3 というように整数で代表する。この方法により、観測地図の情報を二次元配列で表現する。

観測地図は行動パターンが実行され、ロボットの視界が変化した際に更新される。また、ロボットが未観測領域に侵入する際も、ロボットが侵入した領域は観測される。

観測地図はロボットが行動を行った後、未観測領域についての情報が新たに得られると更新される。更新のされ方は 2 通りあり、1 つはロボットがセンサで観測した範囲が観測される場合で、もう一つはロボットが未観測領域に侵入する場合である。

2.5 視界の表現

自律移動ロボットの障害物検知には測域センサが多く用いられている。測域センサはレーザーを放射し、障害物に当たって反射され返ってきたレーザーの波長と基準の波長との位相差、または時間差から障害物までの距離を求めている。さらに、複数のレーザーを少しずつ角度を変えて放射することで広範囲の障害物を検知することが可能になっている。

この測域センサをシミュレーション上で実現する方法について述べる。測域センサの位置はロボットの中

Fig.3: ロボットの頂点の座標の決定

Fig.4: 地図の表現方法

心位置とし、センサの観測範囲はロボットの向きを正面として、そこから左右に一定角度広げたものがロボットの視野角となる。この視野角を細かく分割し、それぞれの方向について疑似レーザーを放射し観測を行う。疑似レーザーは直進し、グリッドが侵入可能領域であればさらに先を観測し、障害物のあるグリッドに達するとそこで止まる。

疑似レーザーが通るグリッドはブレゼンハムの式を基にしたアルゴリズムをグリッドに適用することで求めている。

2.6 コスト関数

本研究のアルゴリズムの移動コスト (COST) は次式のように求める。

$$COST = Ca(action) + Cr(map, x, y) + h(x, y, \theta) \quad (1)$$

この式において Ca は行動に必要な時間に基づくコストで、その大きさは行動パターンに依存する。 h は目的地までの距離と目的地の方向に基づくコストで、現在の目的地までの距離と、目的地の方向とロボットの向きのずれに比例して増大する。 Cr は未観測領域への侵入面積に基づくコストで、その大きさは図のように未観測領域へ侵入した際、侵入した面積に比例して増大する。

Cr の比例係数を Ca と h に比べて十分大きくとすることで、未観測領域へ侵入する行動セットはよりコストが大きくなるため拡張されにくくなり、未観測領域に侵入しない行動セットが拡張されやすくなるため、安全な経路が優先的に生成される。

例として図 5 において、前進する場合は未観測領域に侵入しないが、後退する場合は未観測領域に侵入してしまうため、コストが大きくなり、拡張されにくくなる。

3 探索の効率化

探索の効率化のためには、重複する状態を排除することが効果的である。例えば、ロボットの位置をグリッド

Fig.5: 未観測領域への侵入

Fig.6: 地図の番号

で表し経路をグリッドへの移動で考える処理では、同じグリッドに至る行動セットが複数ある場合にコストが最も小さいものを残して他の行動セットを拡張の必要がないと判断して消すことができる。行動セットを減らすことで拡張回数が減るので、経路計画にかかる時間を抑えることができる。

本研究のアルゴリズムでは、ロボットの座標や向きに加え、観測地図の情報があるため、同じ地図であることを判断するにはグリッド一つ一つを比較しなければならず、必要のない行動セットであると判定すること自体に時間がかかり、効率化することが難しい。そのためある場所で回転し続ける行動セットや、同じような行動をする行動セットが複数生成されて残り、計算量が増加し、消費する記録領域が増加することが問題となる。

そこで、地図が更新されない間であれば、同じ位置、同じ向きになる行動セット間でコストのみで行動セットを比較が可能であることに着目した。地図を区別するために、地図idというもの定義する。地図の更新がない同じ地図に同じ地図idを定義して、地図idが等しい時には同じ地図であると判断するという方法を考える。図のように同じidごとにグループ化することで、同じ地図を持つグループができ、このグループの中では従来法と同様に効率化が可能である。

すなわち、図6の1のグループや3のグループのように地図の更新が行われなかった間、同じグループ内で位置、姿勢が近く、かつコストが小さい状態があれば、その候補は拡張しない。

4 実験

前章までに述べた手法を統合して、シミュレーション上でいくつかの環境地図においてロボットの経路計画実験を行う。この実験では 70×70 のグリッドで与えられた環境で、ロボットを初期位置から目的地まで移動させる。

ロボットの行動パターンは前進、後退、右旋回、左旋回の4パターンで与えられており、前進、後退では2グリッド幅分移動し、右旋回、左旋回では30度分その場で向きを変える。

実験1,2ではロボットの視界は初期状態から未観測領域に侵入せず前進可能な最小の視界である前方92度に設定した。実験3では視界を狭め、前方32度に設定した。

初期位置は指定したグリッド座標の中心に指定し、ロボットの回転中心が初期位置になるように設定する。

目標位置は指定したグリッド座標の中心に指定し、ロボットの回転中心が目標位置から一定の距離に侵入する経路が生成された場合、その経路をアルゴリズムによって得られた経路とする。

図7および図8は、初期位置から見えない位置に目標位置がある場合に、A*法と提案手法でそれぞれ経路を生成し、その移動軌跡をコマ送りで示したものである。

図9および図10は、初期位置のすぐ後ろに目標位置がある場合に、A*法と提案手法でそれぞれ経路を生成し、その移動軌跡をコマ送りで示したものである。

初期状態ではロボットの視界に入っている部分だけが観測されている。青色の図形はロボット、赤線はロボットが生成した経路、緑色の領域は未観測領域、赤色の領域は未観測の障害物、白色の領域は観測された侵入可能領域、黒色の領域は観測された侵入不可領域である。Gは目標位置を表す。目標位置については、ロボットの中心が目標位置から一定距離内に入った場合到達したものとす。

Fig.7: 実験1においてA*法で生成された経路

Fig.8: 実験1において提案手法で生成された経路

Fig.9: 実験 2 において A*法で生成された経路

Fig.10: 実験 2 において提案手法で生成された経路

Fig.11: 実験 3 において提案手法で生成された経路

表 1: 実験結果の比較

地図	実験 1		実験 2		実験 3	
経路計画手法	A*	提案	A*法	提案	A*	提案
拡張回数 (回)	12520	157	33	35	10	313
コスト Ca	88	93	70	106	9	49
侵入未観測領域	44	0	67	0	108	69

表 1 に、実験 1、実験 2 について得られた経路について経路を得るまでの拡張回数、経路の行動に必要な時間に基づくコスト、侵入した未知領域の値を示す。拡張回数は経路が生成されるまでの時間、行動に必要な時間に基づくコストは移動に必要な時間の目安となる。

実験 1 について、図 7 と図 8 のそれぞれの経路を比較すると、A*法で得られた経路の方が短く、目的地まで早く移動することができる。これは表 1 において必要な時間に基づくコスト Ca が小さいことから明らかである。しかし図 7 の 2 では、初期位置で旋回を行っているため、多くの未観測領域に侵入してしまっている。表 1 の侵入未知領域を見ても、A*法で生成された経路が多く未観測領域に侵入しており、危険な経路であることがわかる。提案手法は遠回りの経路だが、表 1 を見ると侵入した領域が 0 であることから、未観測領域に侵入しない安全な経路であることが確認できる。

実験 2 について、初期位置のすぐ後ろに目標位置があるため、図 9 のようにその場で旋回して後ろに移動するのが早い。しかし、図 9 の 2 や 4 では未観測領域へ侵入してしまい、A*法で得られる経路は安全な経路ではない。この場合も提案手法では図 10 で示すように安全に旋回できる位置まで前進してから移動することで、未観測領域への侵入を最小限にしている。

図 11 はロボットの視界を狭くし、ロボットの前方に目標位置を設定して実験 1 と同様の実験を行った場合の提案手法で得られた経路を 1 行動ずつ順に表したものである。地図では、目標位置へ直進するのが最短経路であり、A*法では直進する経路が生成されるが、直進すると多くの未観測領域へ侵入してしまう。図 11 において提案手法では最初に左右旋回を行い、前方の未観測領域を減らしてから移動することで、未観測領域への侵入を最小限にしている。表 1 から未観測領域への侵入が直進する場合よりも少なく、より安全であることが確認できる。

5 結言

本研究では、未観測領域と観測済領域を区別し、未観測領域への侵入を可能な限り避けつつ、静的環境において、初期位置から目標位置まで移動可能な経路生成アルゴリズムを実現した。

本研究の手法では、経路計画において未観測領域が観測された場合には侵入可能領域になることを想定しているが、実際に移動を行い未観測領域を観測した時に障害物が存在する場合も考えられ、そのような場合に再計画を行う処理が必要であると考えられる。また、図 11 のように未観測領域への侵入が避けられない場合、衝突を予測してロボットや周囲の環境を破壊しないようにゆっくり動くことで、危険を減らすことができると考えられる。さらに、動的環境では、一度観測した領域でも時間の経過により情報が不確かなるため、観測された状態と未観測の状態の間の状態を定義し、観測が行われない間段階的に観測された状態が未観測状態になるようにするなどの工夫が必要である。

このような改良を加え、安全かつ継続的に行動を可能にし、本研究の経路計画アルゴリズムの動的環境への対応と実機への実装を行うのが今後の課題である。

謝辞

本稿の研究開発は、科学研究費補助金・若手研究 (B) 課題番号 23700228 の一環として行われた研究である。

参考文献

- 1) Dijkstra E.W., A note on two problems in connexion with graphs, In Numerische Mathematik 1, S. 269 ~ 271, 1959.
- 2) Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B, A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics SSC4 (2), pp.100-107, 1968..