

# Generalized Voronoi Graph を用いた移動ロボットの未知環境探索 — 構築中のグラフ上での自己位置推定方法 —

○永谷 圭司 (岡山大学工学部)    Howie Choset (CMU)

## Towards Exact Localization without Explicit Localization with the Generalized Voronoi Graph

○Keiji Nagatani(Okayama University)    Howie Choset(CMU)

### 1 まえがき

筆者らは移動ロボットによる未知環境探索を実現するため、Generalized Voronoi Graph (以下GVGと略す)を逐次構築する手法を使用している。本稿では、実環境にこの手法を適用する際に生ずる推定位置誤差の問題への対処法について、の提案を行う。これは、ロボット付近のローカルなGVGと、すでに構築されたGVGの比較により、グラフ上におけるロボットの位置を推定するものである [2]。

### 2 GVGを用いた未知環境探索手法

移動ロボットの未知環境探索動作を実現するため、本研究では、距離センサ情報を用いて、逐次GVGを構築する手法を用いている。以下にGVGを用いた未知環境探索動作の基本手順を示す (この手法の詳細については、[1]を参照)。

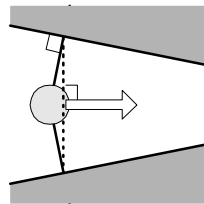


Fig.1: Tracing

- 1) **GVGへのアクセス**: 2つの障害物までの距離が等しくなるまで、最も近い障害物から遠ざかる動作を行う。
- 2) **GVGのトレース**: GVGを逐次構築するため、ロボットはGVGをトレースする動作を行う。このトレース動作は、2つの障害物までの距離が一定となるようにロボットを走行させることで実現する。この動作の概略をFig.1に示す。
- 3) **ミートノードの獲得**: 3つ以上の障害物までの距離が等しくなる地点 (この点をミートノードと呼ぶ) でGVGは分岐する。ロボットがここに到達すると、その地点を記憶し、未探索の領域のGVGのトレースを続ける。
- 4) **境界ノードの獲得**: ロボットが障害物に接近した場合、ロボットは先に進めないため、その地点でGVGは途切れる (この点を境界ノードと呼ぶ)。そしてロボットは停止し、その地点を記憶する。
- 5) **GVGのバックトラック**: もし、ミートノードにおいて、未探索のGVGが存在しなければ、未探索のGVGが存在するミートノードまでGVGをバックトラックする。境界ノードにおいては、必ずバックトラックする。
- 6) **終了条件**: 全てのミートノードにおいて、未探索のGVGがなくなった場合、未知環境探索は終了する。

### 3 問題提起

上述した手法がうまく働くためには、ロボットは、「到達したミートノードが新しく生じたものか、かつて訪れたことのあるものか」を判別する能力を有する必要がある。ロ

ットが有する自己位置情報が正確な場合には、この判別は容易である (各ミートポイントの座標を覚えておくだけで良い)。しかしながら、オドメトリを使用するロボットの推定位置には、走行に伴って生ずる累積誤差の問題がある。

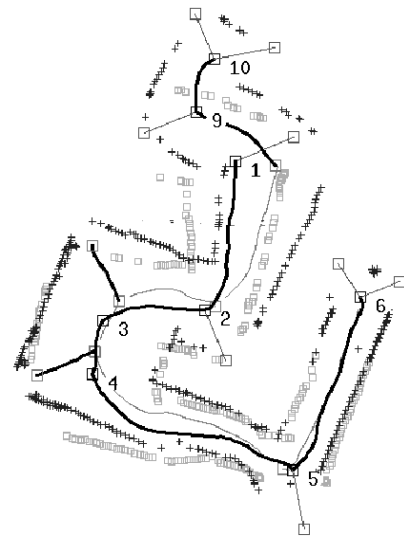


Fig.2: Dead Reckoning Error

Fig.2は、GVG手法を用いた未知環境探索動作の実験結果であるが、この累積誤差の問題をよく表している。環境は屋内 (約7×14メートル)、使用した移動ロボットはNomadic社製のNomad200 (16方向の超音波アレィセンサ有する)である。ロボットは、図中のノード1から走行開始してノード6まで走行し (障害物までの距離情報は四角、走行経路は黒の太い実線で記述)、走行したGVGをたどってノード1まで戻ってきた (障害物までの距離情報はプラスマーク、走行経路は薄い実線で記述)。この時のロボットの位置は、図より元の地点から数十センチメートルほど離れたところに到達したように見える。しかしながら、ロボットは、センサ情報を使用しているため、ほぼ正確に元のノード1の位置に到達した。したがって、この図で表される誤差が、ほぼロボットのオドメトリの誤差と言える。

以上より、オドメトリによる推定位置情報をミートノードの判別にそのまま使用することは危険であると言える。

### 4 トポロジーを用いたGVGの表現法

前章で示した問題を解決するため、本研究では、GVGをトポロジーで表現することを試みる [2]。具体的には、以下に示す手順で、未知環境探索動作を行なう。

ロボットが、記憶していないミートノードまたは境界ノードに到達した場合、以下の情報を記憶する。

- 1) 現地点の前に訪れたノードのラベル
- 2) 現地点の前に訪れたノードからの距離情報
- 3) GVG の分岐方向

これらの情報から、GVG のトポロジーを逐次構築していくことができる。また、作成した GVG のバックトレースは、記憶した走行距離分だけセンサ情報を用いて GVG を再トレースすることで実現する。

ここでの特徴は、近隣のノードとの関係のみを用いて GVG を構築しているため、ノード間の距離情報を求める時以外に、オドメトリ情報を使用していないという点にある。

Fig.3は、提案した手法を用いて行った未知環境探索動作の結果であった。上述した手法に示したとおり、ロボットはワールド座標を無視し、センサ情報を用いて走行しているため、ノード1の場所に戻ってきた際も現実には誤差がほとんどなく、そこから未知領域であるノード10まで走行することができた。

比較的シンプルで、かつサイクルのない環境の場合では、オドメトリの誤差が大きく影響する環境においても、上記の手法は有効に働く。しかし、環境にサイクルが存在する場合、この手法は破綻をきたす。なぜならば、一週回って戻ってきたロボットが見つけたミートノードが、かつて訪れたことのあるミートノードかどうかを判別できないからである。この問題を解決するため、次章ではトポロジーマッチングによる新旧ミートノードの判別手法を紹介する。

## 5 トポロジーマッチング

「到達したミートノードが新しく生じたものか、かつて訪れたことのあるものか」をワールド座標系を用いずに判別するもっとも直感的な方法は、そのミートノードでのセンサ情報を用いることである。しかし、似たような交差点が存在した場合、その地点でのセンサ情報だけを用いて、結論を出すことはできない。

そこで、本研究ではトポロジーマッチングを用いて、この曖昧さを減少させることにした。具体的な手順を以下に示す。

- 1) 新しいミートノードに到達した地点で、ロボットはセンサ情報をノード情報に付加する。
- 2) もし、過去に記憶したノードのセンサ情報と現在のミートノードのセンサ情報が一致した場合、各ノードに接続する GVG をたどり、近隣のノードのセンサ情報を比較する。このとき、ノード間の GVG の特徴についても比較を行う。
- 3) 2) の比較を適当な回数繰り返し、各情報が全て一致した場合に、ロボットはかつて訪れたミートノードであると判断する。

つまり、この手法では、ロボットが到達したミートノードの付近のローカルな GVG を、既に構築した GVG 全体とのマッチングをとることで、誤一致の問題を減少させている。

この手法を適用した実験結果を Fig.3 に示す。この実験では、ミートノードのセンサ情報には、GVG の分岐の個数と障害物までの距離情報を使用した。また、ノード間の GVG の特徴には、ノード間距離を使用し、マッチングするノード数を3とした。

ロボットは、ノード1からスタートし、ループを一周してノード1に戻ってくるが、センサ情報のみでは、ロボッ

トはそのミートノードがノード1かどうかを判断できない。そこで、このノードを新しいノードと考え、ノード5とした。ここでセンサ情報は、ノード5とノード1が一致した。次にロボットは、ノード2の位置に移動し、これをノード6とした。ここでセンサ情報は、ノード6とノード2、ノード5とノード1が一致し、さらに各ノード間の距離が一致した。さらにロボットがノード3の位置に到達したとき、ノード1,2,3はノード5,6,7と一致し、各ノード間の距離が一致した。これにより、ロボットはこれらのノードが過去に訪れたノードと判断し、環境中にループが存在すると結論づけた。その後、ロボットはノード9まで走行し、バックトラックした後にノード10に到達し、環境の探索を終了した。

この実験より、トポロジーマッチングを行うことで、オドメトリを用いたワールド座標の推定位置情報を使用することなく、未知環境探索動作を行うことができることが確認された。また、マッチングにノード間距離を使用することで、組み合わせ爆発は押さえられている。

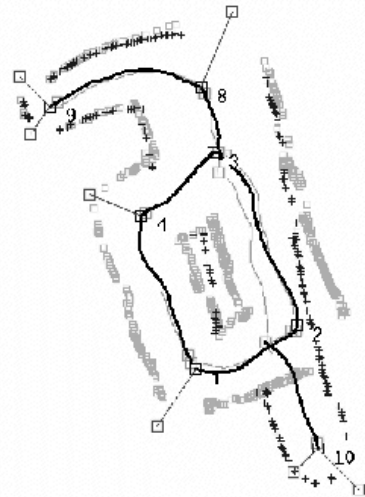


Fig.3: Exploration in Loop Environment

## 6 むすび

本稿では、GVG の逐次構築による未知環境探索手法を紹介し、さらにトポロジーマッチングを用いた自己位置推定方法を提案した。ただし、ここでの自己位置とは、ワールド座標ではなく、GVG 上のノードの位置である。本手法は、オドメトリ情報を直接使用していないため、広範囲の未知環境探索に適すると考えられる。

## 参考文献

- [1] H.Choset and I.Konuksven and A.Rizzi : Sensor Based Planning: A Control Law for Generating the Generalized Voronoi Graph, Proc. of IEEE Int. Conf. on Autonomous Robots, 1997.
- [2] Keiji Nagatani and Howie Choset and Sebastian Thrun : Towards Exact Localization without Explicit Localization, Proc. of IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp342-348, 1998.