

# ステアリング型移動ロボットによる Generalized Voronoi Graph を用いた未知環境の探索

## Sensor Based Navigation for car-like mobile robots using Generalized Voronoi Graph

正 田中 豊(岡山大院)

正 永谷 圭司(岡山大院)

学 岩井 洋介(岡山大院)

Yutaka TANAKA, Okayama University, 3-1-1, Tusimanaka, 700-8530, Okayama  
Keiji NAGATANI, Okayama University  
Yosuke IWAI, Graduate School of Engineering, Okayama University

**Abstract:** Our research objective is to realize sensor based navigation by car-like mobile robots. Generalized Voronoi Graph has an advantage to describe mobile robot's path from the point of view of completeness and safety, therefore it is used for local path planning. However, it is impossible to apply the path to car-like mobile robot directly, because limitation of minimum turning radius prevents following non-smooth GVG. To solve the problem, we propose local smooth path planning algorithm for car-like mobile robots. In this paper, we introduce the path planning algorithm based on GVG, and verified the effectiveness the algorithm through several experiments in real environment.

**Key Words:** Sensor Based Exploration, Generalized Voronoi Graph, Car-like Robot

### 1. はじめに

移動ロボットが未知環境において、移動可能な環境を把握することは、重要なタスクである。また、移動ロボットを実現する際、機構の汎用性、走行制御の安定性、実装の容易さなどを考慮すると、ステアリング型移動機構を採用する利点は大きい。そこで筆者らは、ステアリング型の移動ロボットによる未知環境探索動作を目指すこととした。ただし、この機構では、その場での回転や、真横への移動ができない。このため、動作探索を行う際の経路計画には、この機構の操作性を考慮する必要がある。

本研究では、Generalized Voronoi Graph (以下 GVG と略す)の理論<sup>[1]</sup>に基づいたステアリング型移動ロボットによる未知環境探索手法を提案するとともに、実環境における走行実験を行い、その有用性を検証した。本稿では、この手法と実験結果について述べる。

### 2. 関連研究

本研究で取り扱う研究課題は、未知環境探索と、非ホロノミックな移動ロボットの動作計画の分野に関連が深い。そこで、筆者らの研究に特に大きな影響を与えたものを以下に挙げる。

#### 2.1 未知環境探索手法

未知環境探索手法には、様々な手法提案されてきた。その一つとして、Lumelsky らによって提案された Bug algorithm<sup>[2]</sup>がある。このアルゴリズムでは、1つの触覚センサによって頑強な探索が可能となることが示されている。しかしながら、実ロボットが実際に探索を行う場合は、より強力なセンサを持つことが可能であり、触覚センサのみによる未知環境探索手法が、実環境内において適していると考えにくい。

一方、逐次的な手法として、GVG<sup>[1]</sup>を生成する方法がある。この手法では、周辺の物体までの距離情報を取得することが可能なレンジセンサを利用して、未知環境の探索を行うものである<sup>[3]</sup>。しかし、この手法では、逐次的に検出した GVG 上をロボットが追従可能であることが

前提条件となっているため、本研究で対象とするステアリング型の移動ロボットに対してこのアルゴリズムをそのまま適応することは難しい。

本研究で提案する手法は、上述の GVG の理論による未知環境探索手法に主体を置くものである。ただし、ロボットは、GVG 上を忠実に追従するものではなく、局所的な GVG を検出し、それにできるだけ追従する経路を計画する手法を用いる。

#### 2.2 非ホロノミックな移動ロボットの走行

ステアリング型の移動機構を持つロボットの動作には、実環境において多くのヒューリスティックな手法が適応されてきた。

一つの実験的な手法として、トレーラ型のロボットが曲がり角を曲がる際に適用する方法<sup>[4]</sup>があるが、対象環境は、制限されている。

非ヒューリスティックなアルゴリズムでは、円弧と直線の組み合わせによる動作計画が Reeds らによって提案された<sup>[5]</sup>。この手法では、円弧の半径がロボットの持つ最小回転半径よりも大きい場合の経路生成が議論されている。しかしながら、これらの非ヒューリスティックな研究では、実環境でロボットを動かしたものは少ない。

#### 2.3 筆者らのこれまでの研究

ロボットの形状を考慮した場合、コンフィギュレーション空間を利用することは、実環境内の動作計画において大変有効である<sup>[6,7]</sup>。筆者らも、実環境内においてレーザレンジファインダの情報に基づいてロボット周辺のコンフィギュレーション空間を構築し、この中で局所的な経路の計画を行う手法<sup>[8]</sup>を提案した。しかしながら、この手法では、ロボットが移動するごとにコンフィギュレーション空間の計算を行う必要があった。このため、実環境での未知環境探索動作への適用は難しい。

そこで、コンフィギュレーション空間を生成せず、ロボットを長方形で近似した衝突判定を行うこととした。これにより計算コストを比較的抑えることができ、実機への実装を可能とした。

### 3. GVGを用いた従来の未知環境探索手法

#### 3.1 2次元平面のGeneralized Voronoi Graph

2次元平面におけるGVGとは、"ある点から2つ以上の凸物体までの距離が等しくなる点の集合"である。\$d\_i(x)\$を距離関数(点\$x\$から対象物\$C\_i\$までの最短距離)と定義するとGVG上の点は2つの対象物までの距離が等しくなる点であり、次式で表すことができる。

$$G(x) = [d_i - d_j](x) = 0 \quad (1)$$

特に、(2)式を満たす3つ以上の対象物までの距離が等しくなる点については、GVGを構成する複数のエッジが合流する点となるので、ミートノードと呼ぶ。

$$G(x) = \begin{cases} d_i - d_j \\ d_i - d_k \end{cases} = 0 \quad (2)$$

また、\$d\_i(x)=d\_j(x)=0\$となる点は、グラフが障害物に接する点であるので、境界ノードと呼ぶ。

上述より、(1)式を満たす点で、ミートノード、または境界ノードでない点の集合は、ノード間を結ぶ曲線を構成する。これをGVGエッジと呼ぶ。

Fig.1は、対象物\$C\_i, C\_j, C\_k\$が存在するときのGVGの例を示している。ここで、丸印となる点が、ミートノード、太線がGVGエッジである。

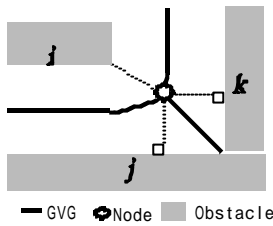


Fig.1 GVG

#### 3.1 GVGを用いた未知環境探索手法

一般にGVGは、任意の障害物の表面を、いずれかのGVG上の点から観測することができるが知られている。したがって、センサの測定範囲を考慮しなければ、未知環境においてGVGを獲得することは、未知環境探索を完了することと等価といえる。また、GVGは、距離センサを用いることで、逐次的に獲得することができるが知られている。移動ロボットによってGVGを獲得する手順を以下に示す。

##### 1) GVGへのアクセス

まずロボットは、GVG上に移動するための動作を行う。これは、レンジセンサにより得られた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ことにより達成される。

##### 2) GVGのトレース

GVGを逐次構築するため、移動ロボットはGVGエッジを追従する動作を行う。この動作は、距離センサより獲得した2つの障害物までの距離を一定としつつ移動することで実現する<sup>[9]</sup>。

##### 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いミートノードで、GVGは分岐する。距離センサを用いて、ロボットがここに到達したと判断すると、この

地点を記憶し、未探索のGVGエッジに対して探索を行う。

##### 4) 境界ノードの獲得

距離センサから得られる距離が十分に小さい場合、ロボットは先に進むことができない。そこでこの点を境界ノードと判断して記憶し、走行してきたGVGエッジを再び追従走行する(バックトラック)。

##### 5) GVGのバックトラック

各ミートノードにおいて、未探索のGVGエッジが存在しなければ、それが存在するミートノードまでバックトラックする。

##### 6) 終了条件

2)~5)を繰り返し、全てのミートノードにおいて、未探索のGVGエッジがなくなった場合が探索の終了条件となる。

上述の手順に従って構築したGVGの例をFig.2に示す。ただし、GVGエッジを実線で、ミートノードを丸印で示す。

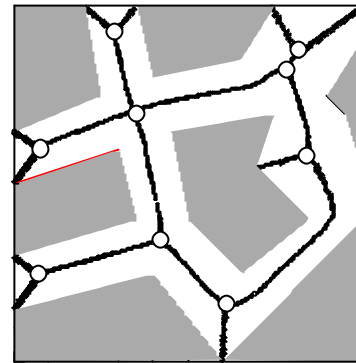


Fig.2 Topological map based on GVG

#### 3.3 Reduced GVGの適用

本研究では、不要な探索動作を軽減すると同時に、ロボットが探索動作を行う上で、ミートノードの誤認識を防ぐため、Reduced Generalized Voronoi Graph(以下、RGVGと略す)を適用することとした<sup>[10]</sup>。この手法は、境界ノードとミートノードの両方を含むGVGエッジを排除することで得られる。

例えば、Fig.3に示す環境では、センサの精度によっては、左図上部の段差を検出できず、ミートノードをスキップしてしまう可能性がある(不安定なミートノードの問題)。ここで、RGVGを適用することで、右図のグラフを獲得することができ、この問題が解消される。

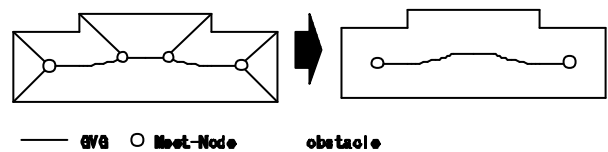


Fig.3 RGVG

#### 4. ステアリング型ロボットへの適応

前章に示した未知環境探索手法では、ロボットには、移動拘束がないことを前提としている。しかしながら、ステアリング型の移動ロボットは、移動に拘束を持つため、常に GVG 上を追従走行できるとは限らない。そこで本研究では、局所的に GVG を先読みし、これを追従可能な経路に修正することで、ステアリング型移動ロボットによる環境探索動作の実現を目指す。具体的な手順を次の ~ に示す。また、5 章より 7 章にて、その詳細を説明する。

距離センサより局所的な GVG を検出  
 走行可能経路の生成 (複数)  
 各経路の評価値計算と最適経路の選択

#### 5. 距離センサから局所的な GVG を検出

障害物を凸物体に切り分けることができれば、GVG 及びミートノードを求めることは難しくない。しかしながら、実環境においては、距離センサから得られた測距誤差を含む情報を元に、障害物の切り分けを行うことは難しい。そこで本研究では、以下に示す手順に従って、局所的な GVG の検出を行う。

##### 5.1 GVG の先読み範囲

本研究では、距離センサから得られる距離情報のうち、半径  $L$  m までに距離情報を限定する ( $S_L$ )。また、障害物の裏側に位置する領域 (オクルージョンエリア:  $S_o$ ) については、GVG の検出を行わないこととする。これより、GVG を検出する範囲  $S_{GVG}$  は次式で表される、

$$S_{GVG} = \{ S_L \wedge \bar{S}_o \}$$

Fig.4 は、岡山大学自然科学研究科棟 7F の電子計算機室入り口付近で採取した距離データである。ここで、凹凸な点が距離センサから得られた距離データであり、ロボットが GVG を検出する領域  $S_{GVG}$  は、灰色で示した領域となる。なお、距離センサには、浜松ホトニクス社製の全方位レーザレンジファインダ (C8074) を使用した。このセンサは、一周 500 ポイントの距離データを取得することができ、5m 程度の範囲内における各距離誤差は ± 約 150mm である。

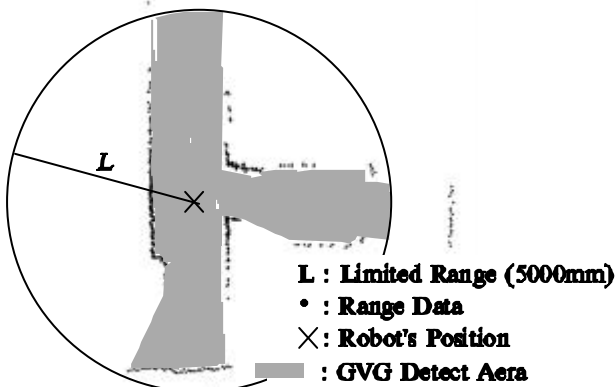


Fig.4 Target area

##### 5.2 GVG 上の点の検出

$S_{GVG}$  内における任意の位置 (基準点) から GVG 上の点 (以下 GVG-point とする) を検出する手法として、本研究では、以下の手順を用いる。

- 1) 距離情報より、基準点からレンジデータまでの距離が最も小さい点 (最近点) を検出する。
- 2) 基準点を中心とし、最近点を通る円を設定する。この円を探索円と呼ぶ。
- 3) 探索円内の距離データの点について、隣り合う距離データ間の距離が  $l$  以上離れていれば、異なる障害物上のデータであるものとして、距離データのグループ分けを行う。また、各グループ内で、基準点にもっとも近い点から、基準点までの距離をグループ距離と定義する。このとき、異なるグループにおいて、このグループ距離が等しくなれば、探索円の中心位置が GVG-point となる。特に、3 つ以上のグループ距離が等しい場合がミートノードとなる。この手順を Fig.5 に示す。なお、距離  $l$  については、ロボットの通過可能なサイズとした。
- 4) 探索円内にグループが 1 つしか存在しない場合、最近点から基準点に向かう方向を延長した位置に新たな基準点を設け、2), 3) を繰り返す。これにより、GVG-point の検出が可能となる。

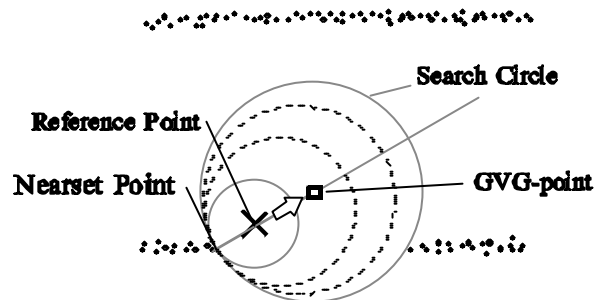


Fig.5 GVG-point Detection

##### 5.3 GVG の検出領域の限定

$S_{GVG}$  内の全ての位置において、5.2 節に示す計算を行うことで、GVG の検出は可能となる。しかし、この場合、計算コストは膨大となる。また検出される GVG は、点の集合で表現されてしまうため、経路として扱うことが難しい。

そこで本研究では、まず、 $S_{GVG}$  内の隣り合う 2 組の距離データにおいて、2 点間の距離が  $l$  以上離れたところを検索する。次に、その 2 点の中点を基準点として設置する (この点は必ず GVGpoint となる)。ここから、5.2 節に示す手法を適用し、検出された新たな GVGpoint を再び基準点として繰り返すことで、GVG を伸ばす。

上述の GVG の検出手法を Fig.4 の環境に適用した結果を Fig.6 に示す。放射状に伸びる線分の中心が観測点であり、線分の終端が基準点の開始地点である。そこから、5.2 節に示す手法を適用し、繰り返し GVGpoint を求めることで、GVG を獲得することができた。

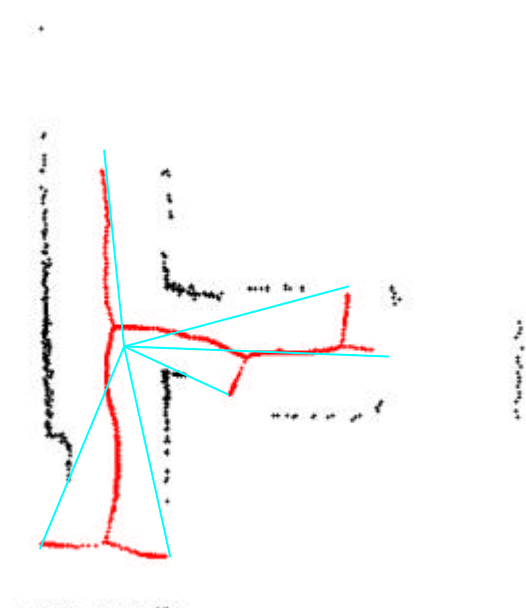


Fig.6 Local GVG Construction

#### 5.4 信頼できるGVGの範囲

障害物によって隠された部分は、地点から確認することは不可能である（オクルージョン問題）。このため、5.3 節に示した手法のみでは、得られた GVG が実環境に対して正しいものであるという保証はない。そこで、オクルージョンを考慮し、GVG の中から実環境に対して信頼の出来る部分を選別する必要がある。

さて、オクルージョンエリアの影響がない情報に基づいた GVGpoint であれば、信頼することの出来る GVG であると言える。そこで、各 GVGpoint を構成する探索円内にオクルージョンエリアが存在する場合、その点を GVGpoint として信頼しないことにする。この条件を Fig.6 の GVG に適用すると、信頼できる GVG は、Fig.7 の太線で示したものとなる。

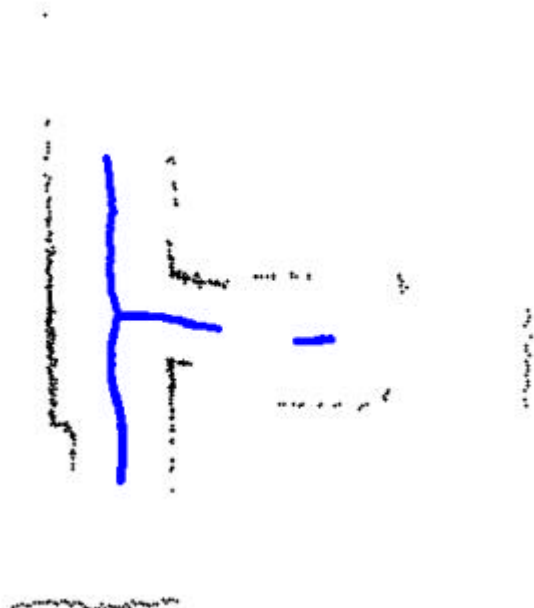


Fig.7 ReliablelocalGVG

## 6. 走行可能経路の生成

次に、得られた GVG をステアリング型の移動ロボットによってトレース可能な経路に再計画するための手法について述べる。

Fig.6 を見てもわかるとおり、特にミートノード付近において、GVG は滑らかでない。このため、最小回転半径が存在するステアリング型の移動ロボットでは、この局所的な GVG を正確に追従できない場合がある。そこで、以下に示す手順を用いて、初期状態(位置・姿勢)と GVG 上に設定したサブゴール間の経路を滑らかな曲線で結ぶことにした。

### 6.1 初期状態・サブゴールの設定

初期状態は、現在のロボットの位置・姿勢である。また、サブゴールは、GVG 上に存在し、その GVG は信頼できることが望ましい。そこで、サブゴールは、初期状態に最も近い GVGpoint に接続する、信頼できる GVGpoint の終端とする。

### 6.2 走行経路の候補の生成

次に、設定したサブゴールまでステアリング型のロボットが走行可能な経路を構築する。本研究においては、滑らかな経路を表現するため、3 次の Bezier 曲線を利用することにした。

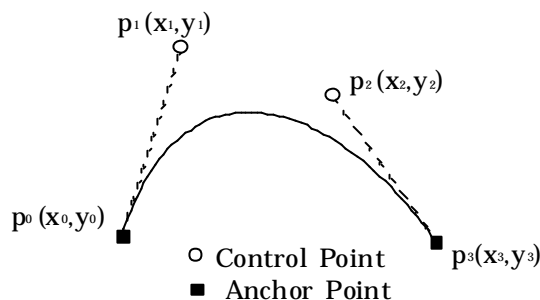


Fig.8 Beziercurve

この 3 次 Bezier 曲線では、2 組の錨点と制御点を指定することで、錨点を通り、隣接する制御点との直線に接した、微分可能な曲線を表現することができる (Fig.8 および下式を参照)。

$$x(u) = (1-u)^3x_0 + 3u(1-u)^2x_1 + 3u^2(1-u)x_2 + u^3x_3 \quad (6)$$

$$y(u) = (1-u)^3y_0 + 3u(1-u)^2y_1 + 3u^2(1-u)y_2 + u^3y_3 \quad (7)$$

$$(0 \quad u \quad 1)$$

ただし、この式において、 $(x_0, y_0), (x_3, y_3)$  を錨点、 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  を制御点、媒介変数を  $u$  とした。

本研究では、この 3 次 Bezier 曲線を局所的な経路計画に利用する。ロボットの現在地点及び姿勢とサブゴールを錨点とし、この間を 3 次 Bezier 曲線で表現する (Fig.9 参照)。なお、未知パラメータとなる  $L_1, L_2$  は、6.3 節に示す移動による拘束条件と、6.4 節に示す環境による拘束条件によって制限される。

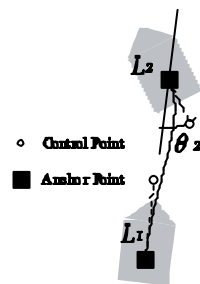


Fig.9 Parameter of Planned Path



### 6.3 移動による拘束条件

ステアリング型の移動ロボットは、その最小回転半径以上の半径を持つ円弧と、その共通接線で表された経路上をトレースすることが可能である。つまり、ロボットの最小回転半径を  $R$  とした場合、追従可能な最大曲率は、次式により得ることができる。

$$\rho = \frac{1}{R} \quad (8)$$

このとき、3次 Bezier 曲線により計画された経路の曲率が、 $0 \leq u \leq 1$  において よりも小さければ、対象とするロボットが追従可能であるといえる。なお、3次 Bezier 曲線の曲率は、次式で求められる。

$$k(u) = \frac{\left(\frac{d^2}{du^2}y(u)\right)\left(\frac{d}{du}x(u)\right) - \left(\frac{d}{du}y(u)\right)\left(\frac{d^2}{du^2}x(u)\right)}{\text{leng}\left(\left(\frac{d}{du}x(u)\right)^2 + \left(\frac{d}{du}y(u)\right)^2\right)} \quad (9)$$

ここで、 $\text{leng}$  はベジェ曲線の長さを表す。

### 6.4 環境による拘束条件

実環境内においてのロボットの経路計画を行う場合、そのロボット自身の大きさを考慮する必要がある。本研究では、ロボットを長方形のモデル (Fig.10) で近似し、計画した経路が  $0 \leq u \leq 1$  の範囲で障害物と衝突していなければ、無衝突経路であるとする。

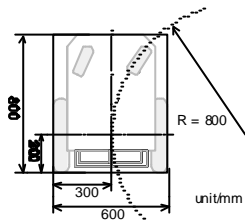


Fig.10 Robot's model

### 7. 経路の評価と選択

本研究では、前章で示した方法により生成した複数の経路を評価・選択することで、ロボットが走行すべき最適経路を選択する。

まず、経路上の任意の点  $x$  において、ロボットと障害物までの最短経路を求め、これを  $j(x)$  とする。

$$j(x) = d_0(x) \quad (10)$$

ただしこの距離は、ロボットの姿勢に依存し、この姿勢は、経路の接線から求まる。Fig.11は、ある環境における  $j(x)$  を示した例である。

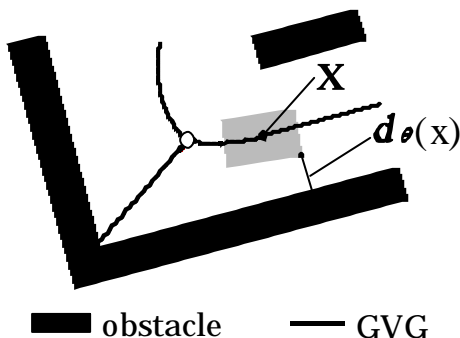


Fig.11 Judge of the point

この  $j(x)$  を、計画した経路の始点から終点まで積分し、経路長で割ったものを、この経路の評価値  $J_L$  とする。

$$J_L = \frac{1}{|L|} \int_L j(x) dx \quad (11)$$

上述の評価を、6.2節に示した経路の候補全てに適用することで、最適な経路を導出することが可能である。ただし、全ての経路に対して、総当たりで計画・評価・選択を行った場合、膨大な計算コストが必要となる。そこで本研究では、遺伝的アルゴリズムを用いて計算を行うことにより計算コストの軽減を行った。この手法を適応することで、実用的な解を効率良く得ることが可能となった。

### 8 走行実験

これまでに示した未知環境探索アルゴリズムを実ロボットに実装し、動作実験を行った。

#### 8.1 ステアリング型移動ロボット

本研究では、電動車椅子 (SUZUKI 社;MC-16) を使用した。このロボットは、時速約 2km/h、最小回転半径 800mm で走行することが可能である。また、このロボット本体には走行・各センサの制御を行うための制御用 PC (CPU:Celeron 450MHz) を搭載しており、OS には、Windows95 を使用している。

距離センサには、浜松ホトニクス社製レーザーレンジファインダ C8074 を搭載した。このセンサは、1回転につき 500ポイントの測距が可能で、1秒間あたり 5回の頻度で全方位の対象物までの距離、及び角度を検出することが可能である。なお、本センサは、ロボットの移動中心である後輪軸中心の鉛直上 585mm (投光部 733.5mm) に取り付けられた。

また、駆動輪には、ロータリーエンコーダを取り付けており、オドメトリによる位置推定も可能である。

このロボットの外観を Photo.1 に示す。

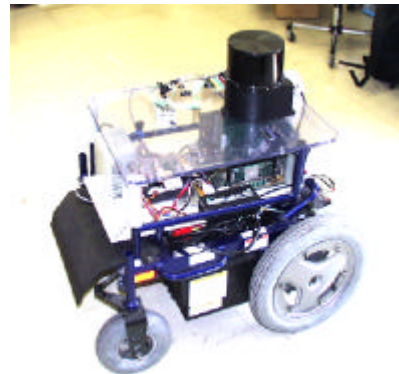


Photo.1 Mobilerobot

#### 8.2 実験環境

実験環境は、屋内環境である岡山大学自然科学研究科棟 7F の廊下とした。この環境では、壁面以外の障害物は存在しない。また、ロボット

が走行不可能な凹凸や、段差等は存在しない。この環境を Fig.12 に示す。

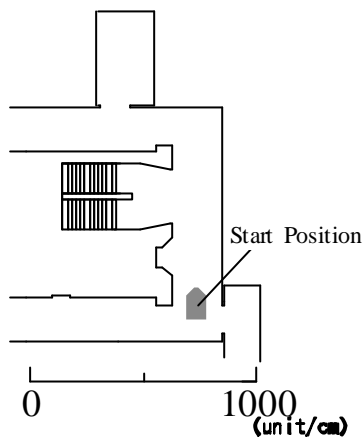


Fig.12 Experimental environment

### 8.3 実験の条件

この実験では、GVG の逐次構築手法の有用性を検証するものであるため、バックトラック動作の実装を行っていない。また、ロボットは検出した GVG に対して、右優先で走行するものとした。このため、本実験における終了条件は、右優先で走行した場合に得られる境界ノード上に到達した場合となる。

### 8.4 実験の結果と考察

Fig.13 は、ロボットがオドメトリで推定した位置情報をもとに、距離情報と局所的な GVG 及び目標経路を重ね合わせたものである。図中の で示した位置において、ロボットは、距離センサにより環境情報を取得し、局所的な GVG 及び経路の更新を行った。

この結果より、ロボットは追従可能な経路を生成し、この経路の追従走行を実現していることがわかる。また、オドメトリを基準とすると、車輪の滑りなどの影響により、自己位置の誤差が累積する。しかしながら、本研究では、距離センサを用いて逐次的に経路を構築・更新しているため、ナビゲーションにおいて、この誤差の影響は無い。また、獲得を目指す情報は、トポロジーで表現される GVG であるため、こちらにもオドメトリの誤差の影響はない。

## 9. まとめと今後の課題

本研究では、ステアリング型の移動ロボットにより、GVG に基づいた未知環境の探索を行うことを目的とした手法について述べた。また、この手法に沿った走行実験を通じて、本手法の有用性を確認することができた。

今後は、検出した GVG に基づいたトポロジカルなマップの生成や、ロボットが GVG をバックトラックする場合の走行方法等を実装し、本研究の目標である未知環境探索動作の実現を目指す。



Fig.13 Experimental Results

### 参考文献

- [1] H. Choset, I. Konukseven, and J. Burdick, "Mo-bilerobotnavigation: Issues in implementation the generalized voronoi graph in the plane," in Proc. of IEEE/MFI, (Washington DC), 1996.
- [2] V. Lumelsky and A. Stepanov, "Path planning strategies for a point mobile automaton moving amidst unknown obstacles of arbitrary shape," in Algorithmica, 2, pp.403-430, 1987.
- [3] K. Nagatani, H. Choset, and S. Thrun, "Toward exact localization without explicit localization," in Proc. of IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp. 342-348, 1998.
- [4] M. Viale, T. Tsubouchi, and S. Yuta, "A practical path and motion planner for a tractor-trailer robot," in Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) '97, vol.2, (Grenoble, Canada), pp. 989-996, 1997.
- [5] J. Reeds and L. Shepp, "Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards," Pacific Journal of Mathematics 145(2), pp. 367-393, 1990.
- [6] J.C. Latombe, Robot Motion Planning. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [7] K. Nagatani and Y. Iwai Y. Tanaka: "Sensor Based Navigation for car-like mobile robots using Generalized Voronoi Graph" Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2001), pp.1017-1022.
- [9] H. Choset, I. Konuksven, and A. Rizzi, "Sensor based planning: A control law for generating the generalized voronoi graph," in Proc. of IEEE Int. Conf. on Autonomous Robots, (Monterey, CA), 1997.
- [10] H. Choset and K. Nagatani "Toward Robust Sensor based Exploration by Constructing Reduced Generalized Voronoi Graph" Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. (IROS 1999), pp.1687-1692.