

確率的障害物地図に基づく視覚移動ロボットの行動制御

○ 根岸 善朗 三浦 純 白井 良明 (大阪大学)

Vision-based robot motion control using a probabilistic occupancy map

○ Yoshiro Negishi, Jun Miura, Yoshiaki Shirai (Osaka Univ.)

Abstract: This paper describes a method of controlling the robot speed using a probabilistic occupancy map. If the robot is not sure that the target region is free, the robot has to observe it several times. We develop a method to determine an optimal speed considering the distance to the region and the uncertainty of map and observation.

1. はじめに

未知環境における移動ロボットのナビゲーションはロボティクス分野において活発な研究の1つである。多くの研究で、不確かさを含んだセンサ情報から出来るだけ正確な地図を作成することが目的となっている^{1, 2)}。

本稿では、未知環境下で目的地に効率的に到達することを目的とする。移動ロボットにおいては、経路と速度の効率的な決定がそれにあたる。このうち、我々は速度決定に焦点を当てる。

ロボットが移動するとき、これから進もうとする領域が障害物のない空き領域であることを確かめる必要がある。したがって、その領域が十分に空き領域だと認識できていない場合には、そこをさらに観測する必要がある。もしそのような領域までの距離が十分に遠ければ、高速で移動してもその領域に到着するまでに多くの観測が得られると期待できる。一方、距離が短ければ、ロボットは速度を落として観測を増やさなければならない。これらのことから、空いているかどうか確定していない領域までの距離に基づいたロボットの速度決定手法を提案する。この手法を用いれば、開けた空間では高速で移動し、曲がり角など先の見通しが悪いところでは速度を落とす、という行動が実現できる。

全方位ステレオとレーザレンジファインダを搭載した移動ロボットでの実験により、本手法の有効性を確認した。

2. 不確実な領域までの距離を基準とした速度制御

文らは、移動や観測の不確かさを考慮した、ロボット周囲の空き領域の広さに基づく速度制御法を提案している⁵⁾。彼らはある速度が安全かどうかを判定する基準を定義し、安全である限りできるだけ高速に移動する手法を提案している。彼らの手法は既知環境を対象としているが、我々はその考え方を空いているかどうか不確実な領域が存在する場合に適用する。

Fig. 1にロボットが前進しているときの例を示す。図中の *free region* は十分に観測する事により空いていると判断された領域を表わす。ここで、まだ十分に観測されておらず、空いているかどうか分からない領域を表わす *undecided region* までの距離が遠い場合、ロボットがその領域に到着するまでに *undecided region* を認識するに十分な回数の観測が得られると考えられる。もし距離が短ければ、ロボットはその領域を観測するために速度を落として走行しなければならない。同時に、ロボットはできるだけ速く走行する事が望まれる。したがって、*undecided region* に到達するまでに十分な観測が得られる最高速度を決定する必要がある。

安全な最高速度 v_{max} を以下のように決定する。未知の領域に対する十分な観測回数を N とし、 d をその領域までの距離、 T を観測周期とすると、ロボットは距離 d 進む間に N 回以上の観測を行わなければならないため、

$$\frac{d}{vT} \geq N \quad (1)$$

の不等式を満たさなければならない。ここで、 v はロボットの移動速度である。このとき、選択できるロボットの最高速度は

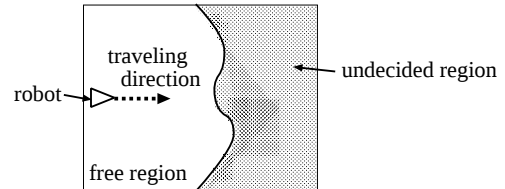


Fig. 1: Free and undecided regions.

$$v_{max} = \frac{d}{NT} \quad (2)$$

となり、 v_{max} がロボットの最高速度である v_{max}^r よりも大きければ v_{max}^r で走行し、小さければ v_{max} で走行する。

速度決定には N と d の値が必要になる。 N は観測や地図の不確かさのモデルから決定されるもので、3節で説明する。 d は生成された経路の距離で、4節で説明する。

3. 確率的障害物地図の作成

距離センサとしては全方位ステレオ³⁾とSICK社のレーザレンジファインダ(LRF)を用い、センサごとに時系列観測データを確率モデルを用いて統合することで、ロボット周囲の障害物の存在確率をグリッドごとに表わす地図を作成する⁴⁾。この地図を確率的障害物地図と呼ぶ。次に、障害物の存在確率のしきい値によって地図のグリッドの状態を *obstacle*, *undecided*, *free space* と分類する。両方のセンサが *free* と判断するか、一方のセンサが *free*、もう一方が *undecided* と判断したグリッドを空き領域とみなし、地図を作成する。我々は、この *undecided* のクラスをさらに2つに分類している。

undecided に分類される状況は、以下の2つである。1つはロボットがその領域を十分な回数観測しているのに、ステレオで特徴の無い面を観測したときのように距離データが得られず、状況を判断するに十分な情報が得られない場合である。この状況では、もう一つのセンサの観測を信頼することになる。もう一方は、その部分の観測回数が少ないために、状況がはっきり分かっていない場合である。この状況は、Fig. 1の *undecided region* に対応する。この状況では、実際には障害物が存在しているのに認識できていない場合があり、たとえもう1つのセンサで空き領域と認識されてもその領域に立ち入ることは危険である。この後者の状況を *undecided without observation* と分類し、観測回数が十分な観測回数の基準である N を超えたとき(前者の状況)、*undecided with observation* と分類する。

十分な観測回数は以下のように決定した。典型的な状況として、センサの測距限界である500[cm]前方の領域の情報が必要であり、ロボットの最高速度である50[cm/frame]で進んでいる状態を考えると、完全に未知(障害物の存在確率が0.5)な領域が *free* だと決定するためには5回の観測が必要になる。このことから、 $N = 5$ とした。

以上の統合方法をまとめるとTable 1のようになる。この処理は毎フレーム行ない、得られる空き領域をロボットの経路作成に用いる。

4. 経路生成手法

この節では目的地までの経路生成手法を説明する。ロボットはロボット周囲の空き領域地図を持っていて、世界座標系で与えられた目的地に自律移動する。もしローカルな地

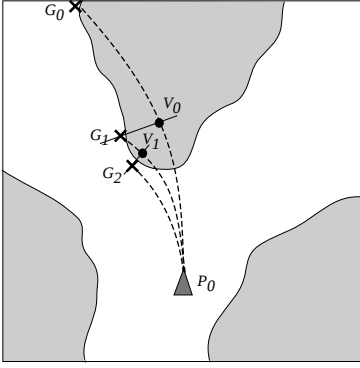


Fig. 2: Find a feasible via point. Gray regions indicate obstacles.

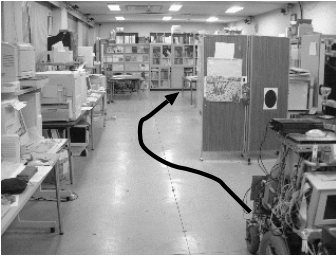


Fig. 3: An example scene.

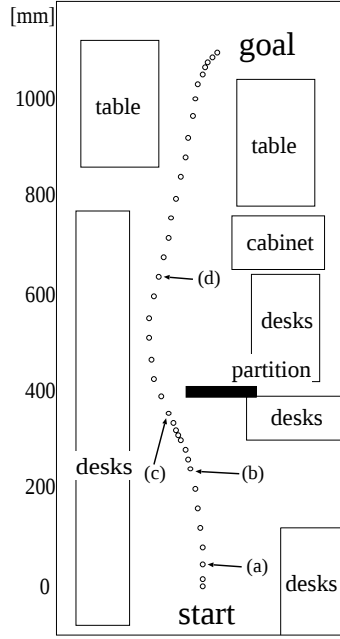


Fig. 4: Experimental result.

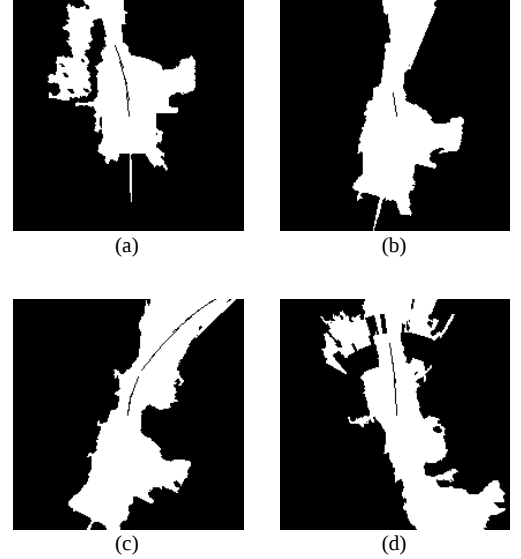


Fig. 5: Free space maps and planned paths.

Table 1: The integration rule.
OB: obstacle FS: free space
UD_{wt}: undecided with observation
UD_{wo}: undecided without observation

		stereo			
		OB	UD _{wo}	UD _{wt}	FS
L	OB	OB	OB	OB	OB
R	UD _{wo}	OB	OB	OB	OB
F	UD _{wt}	OB	OB	OB	FS
	FS	OB	OB	FS	FS

図の中に目的地が存在すればそこを経路生成に用い、存在しなければ空き領域の中で最も目的地に近い点を中間目的地として与える。

Fig. 2に経路生成手法の図を示す。まず、現在のロボットの位置と目的地を結び、かつロボットの向きに接する円弧を描く(図中の円弧 $P_0V_0G_0$)。その経路に対して、ロボットのモデルを置き、それが移動誤差分膨らませた障害物領域に衝突しているかをチェックする。経路が安全ならその経路を選択し、障害物に衝突していた場合は、最も深く障害物領域に入り込んだ点 (V_0) から円弧に垂直な線を引き、その線上の空き領域 (G_1) に対して繰り返し同様の処理を行なうことで、中間目的地を探索する。

中間目的地が決定した後に、その点を現在地として同じ処理を行なう。多くの場合2つの円弧で目標点に到達できることから、探索を2回で打ち切り、2つの円弧の長さの合計を式(2)の d の値と決定する。

5. 実験

Fig. 3の環境で実験を行なった。実験結果を Fig. 4に示す。図中の点が観測地点で、観測周期は約0.4秒である。また、ロボットの最高速度は秒速1メートルである。実験中の空き領域地図と経路探索結果を Fig. 5に示す。白い領域が空き領域で、その中の黒い線が探索された経路を示す。なお、黒い領域は元々の障害物領域であり、移動誤差やロボットの大きさを考慮したものではないことに注意されたい。

移動を始めてしばらくは十分にスペースがあるため最高速度で移動している((a)地点)。ついでに近づいたため回避しているが、このときついでに奥の領域が死角になっているため十分な回数の観測が出来ず、正しく認識できていない。そのため経路が作成できず、観測回数を増やすために速度を落としている((b)地点)。その後、近づきながら観測を増やすことでスペースを認識でき、高速で移動できる程度の観測が得られた((c)地点)。ついでを避けた後は最高速のままゴールまで進み((d)地点)、ゴールに辿り着くことができた。総移動距離は約12[m]で、移動に要した時間は約15[sec]であった。

6. おわりに

本論文では、確率的障害物地図を用い、観測の不十分な領域までの距離に基づくロボットの速度制御法を述べた。観測の不確かさや確率地図作成手法のモデルから、速度決定の指針となる、領域の状態を決定するに十分な観測回数を決定した。そして、未知環境における実験により、本手法の有効性を確認した。

今後の課題としては、もっと広い環境で実験することや、ロボット周囲の空き領域の広さを考慮した速度制御⁵⁾を行なうことが挙げられる。

参考文献

- 1) W. Burgard, D. Fox, and S. Thrun. Active Mobile Robot Localization. *IJCAI-97*, pp. 1346–1352, 1997.
- 2) H. Choset, J. Burdick, S. Walker, and K. Eiamsa-Ard. Sensor Based Exploration: Incremental Construction of the Hierarchical Generalized Voronoi Graph. *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 19, No. 2, pp. 126–148, 2000.
- 3) H. Koyasu, J. Miura, and Y. Shirai. Realtime Omnidirectional Stereo for Obstacle Detection and Tracking in Dynamic Environments. *IROS-2001*, pp. 31–36, 2001.
- 4) J. Miura, Y. Negishi, and Y. Shirai. Mobile Robot Map Generation by Integrating Omnidirectional Stereo and Laser Range Finder. *IROS-2002*, pp. 250–255, 2002.
- 5) 文, 三浦, 白井. 不確かさを考慮した観測位置と移動のオンライン計画手法. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 8, pp. 1107–1113, 1999.