

停留点を生じないポテンシャル場の動的計算による 移動ロボットの効率的未知環境内探索と誘導

山本南 (大阪大学) ○杉原知道 (大阪大学)

1. はじめに

環境の大まかな地図と大まかな目的地が与えられた状況で、障害物の配置と移動可能領域を実地で獲得しながら自律的に自己を誘導する移動ロボットを実現したい。環境とロボットの精緻な幾何形状モデルに基づいて厳密な経路をただ一つ見出すのではなく、時には動的に構成を変える環境内で、実時間制約の下で間断なくロボットを誘導するアルゴリズムが必要である。この目的には、局所的情報のみから即座にロボットが動くべき方向を提示するポテンシャル法 [1] の使用が適している。

ポテンシャル法は、ゴールからの仮想引力と障害物からの仮想斥力の均衡によりロボットが停留してしまう危険を有している。これに対し Connolly ら [2] は、ラプラス方程式を満たすようにポテンシャル場を設計することで原理的に停留点を生じない方法を提案した。ただしこの方法においてポテンシャル場を計算するためには、環境の境界条件、すなわち移動領域内のゴールと障害物の配置が全て予め与えられる必要がある。このため、不可視領域の存在する未知環境では直接利用できない。

本稿では、探索による可視領域拡大とロボットの誘導を同時に行う方法を提案する。Frontier-based アプローチ [3] により、可視領域内にゴールがなければ不可視領域との境界に適宜サブゴールを設定し、動的にポテンシャル場を計算する。これに基づいてロボットを移動させ、再度可視領域と境界条件を更新する。この反復により、ロボットは頑健かつ効率的にゴールへと到達する。

2. Frontier-based アプローチによる境界条件の動的設定

本研究では移動ロボットが、環境の大まかな空間構成とゴール位置は与えられながらも、実際に通過可能な領域は現場にてセンサにより獲得・判断し逐次経路計画しなければならない状況を想定する。このような状況は我々人間も日常的にしばしば遭遇する。

たとえばステレオカメラやレンジセンサ等の外界センサを用いれば、図 1 のように可視領域と障害物（壁面）の配置情報を獲得できる。これに基づいて格子地図を作成する。ゴールが可視領域に含まれていない場合、ロボットは不可視領域を探索しなければならない。不可視領域の境界の一つをサブゴール、それ以外の境界を仮想壁面として暫定的に境界条件を決定 [3] し、次節に示す方法でポテンシャル場を計算することで、探索と誘導を区別することなく行える。たとえば不可視領域の境界上で与えられたゴール位置に最も近い地点をサブゴールとすれば良い。ただし、空間の格子化によって可視領域でありながら孤立した（周囲の 4 格子がいずれも不可視である）領域が生じたら、可視領域から除外する。

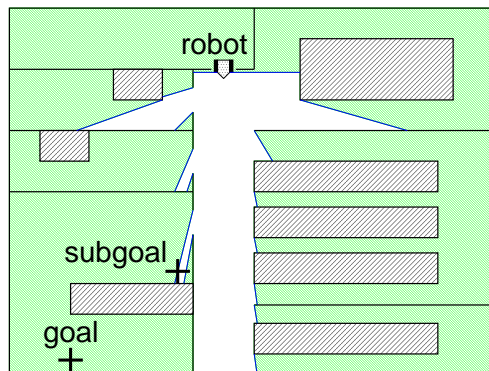


図 1: 外界センサにより獲得された可視領域。不可視領域との境界（青線）のうちゴール最近傍点をサブゴール、それ以外を仮想壁面としている。

求めたポテンシャル場に基づいてロボットを微小移動させ、外界センサにより可視領域を更新する。その際、過去の走査により一度でも可視となった領域は記憶しておく。サブゴールないし真のゴールが可視領域内にただ一つ存在するならば、ロボットは確実にその位置に誘導される。ロボットが停留するのは、可視領域の境界が全て（仮想ではない）壁面となっている状況であり、そのような場合にはそもそも経路が存在しない。

3. ラプラス方程式を満たすポテンシャル場

Connolly ら [2] の方法を紹介する。簡単のため、座標 (x, y) で表現される 2 次元空間を考える。この空間で定義されるスカラポテンシャル関数 $\Phi(x, y)$ が次のラプラス方程式を満たすとき、停留点すなわち全ての方向の曲率が同符号となる点が存在しないことが保証される。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

格子座標 $\langle i, j \rangle = (i\Delta x, j\Delta y)$ を定義する。空間離散幅 $\Delta x = \Delta y = 1$ としても一般性を失わない。 $\Phi_{i,j} = \Phi(i\Delta x, j\Delta y)$ とおくと、式 (1) は次のように近似できる。

$$\Phi_{i,j} = \frac{\Phi_{i+1,j} + \Phi_{i-1,j} + \Phi_{i,j+1} + \Phi_{i,j-1}}{4} \quad (2)$$

可視領域内の点 $\langle i, j \rangle$ が壁面（または仮想壁面）ならば $\Phi_{i,j} = 1$ 、ゴール（またはサブゴール）ならば $\Phi_{i,j} = 0$ として境界条件を与えれば、式 (2) は解ける。これは疎な連立方程式であるので、Gauss-Seidel 法により効率的に求解できる。可視領域と境界条件を更新しポテンシャル場を再計算する際、前時刻の値を初期値とすれば少ない反復回数で計算が収束すると期待できる。

格子点 $\langle i, j \rangle$ における勾配は、次式で近似できる（スケールが揃っていれば、絶対値に意味は無いことに注意

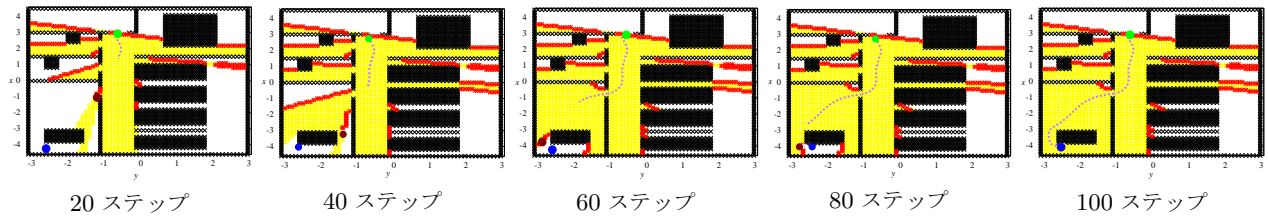


図 2: 試験結果

されたい).

$$\Phi_{x,i,j} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{x=i\Delta x, y=j\Delta y} \simeq \Phi_{i+1,j} - \Phi_{i-1,j} \quad (3)$$

$$\Phi_{y,i,j} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{x=i\Delta x, y=j\Delta y} \simeq \Phi_{i,j+1} - \Phi_{i,j-1} \quad (4)$$

連続的な空間座標 (x, y) における勾配は、この点を囲む 4 個の格子点 (i, j) , $(i+1, j)$, $(i+1, j+1)$, $(i, j+1)$ における格子点上勾配を用いて、次のように重み付き和として与えれば良い [4].

$$\Phi_x(x, y) = \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x, y) \simeq \sum_{i'=i}^{i+1} \sum_{j'=j}^{j+1} w_{x,i,i'} w_{y,j,j'} \Phi_{x,i',j'} \quad (5)$$

$$\Phi_y(x, y) = \frac{\partial \Phi}{\partial y}(x, y) \simeq \sum_{i'=i}^{i+1} \sum_{j'=j}^{j+1} w_{x,i,i'} w_{y,j,j'} \Phi_{y,i',j'} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} w_{x,i,i} = (i+1)\Delta x - x, & w_{x,i,i+1} = x - i\Delta x \\ w_{y,j,j} = (j+1)\Delta y - y, & w_{y,j,j+1} = y - j\Delta y \end{pmatrix}$$

ロボットの移動方向は、ベクトル $[\Phi_x(x, y) \ \Phi_y(x, y)]^T$ を正規化することで得られる.

4. シミュレーション事例

図 3 のようなオフィスを模した環境を想定し、提案方法を試験した. 環境全体を 60×90 個の格子点で表した. 図中、緑点がロボット出発点、青点がゴール、黒十字が障害物、その他 (無印) は通過可能領域である. 簡単のためロボットは大きさを持たず、常に進行方向を前方とすると仮定した. また、前方から $\pm 90^\circ$ の範囲が可視領域になるとした. 出発点において前方は図の真下を向いているものとして、可視領域の検出、サブゴールと境界条件の設定、ポテンシャル場の計算、ロボット微小距離移動をセットとした処理を反復した.

結果を図 2 に示す. 格子点のうち、黄色が可視領域、赤色が不可視領域との境界、茶色がサブゴール、紫色がロボット軌跡である. 毎ステップ、可視領域を拡大しサブゴールを変更しながら、100 ステップで不可視領域にあるゴールに到達した. 環境内を隈なく探索するのではなく、ゴールがあると予想される方向にのみ探索を継続している点にも注目されたい. なお、毎ステップの計算に要した時間は 0.2~0.3 秒であった. 可視領域の検出を安直な方法 (全判定) で行っているため、不利な値になっていることを注記しておく.

図 4 は、異なるゴール位置に対する結果である. この例では、探索の過程で設定されたサブゴールとゴールの間に壁が存在する場面があったが、その後自動的に他の

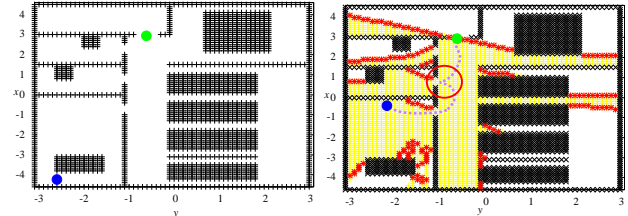


図 3: 試験環境

図 4: サブゴール再設定により経路修正した例

不可視領域との境界に設定されたサブゴールによって進路変更がなされ、最終的にはゴールに至ることができた.

5. おわりに

未知環境におかれた移動ロボットが、可視領域と不可視領域の境界条件を動的に更新することで探索と誘導を区別せずに行う方法を提案した. 原理的に停留点が発生しないポテンシャル場を逐次計算することで、ロボットを頑健かつ効率的にゴールへと誘導できる. ただし、理論的には存在し得ない停留点が数値計算の過程で生じるケースも幾つか起こった. これは既知の問題 [5] であり、提案方法とは別に解決する必要がある.

本研究は、科学研究費補助金挑戦的萌芽研究 (課題番号 #26540135) および科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号 #15H02762) の支援で行われた.

参考文献

- [1] Oussama Khatib. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. In *Proceedings of the 1985 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 500–505, 1985.
- [2] C. Connolly, J. Burns, and R. Weiss. Path Planning Using Laplace's Equation. In *Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 2102–2106, 1990.
- [3] B. Yamauchi. A Frontier-Based Approach for Autonomous Exploration. In *Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium on Computational Intelligence Robotics and Automation*, pp. 146–151, 1997.
- [4] 佐藤圭祐. 極小点のないポテンシャル場を用いたロボットの動作計画. *日本ロボット学会誌*, Vol. 11, No. 5, pp. 702–709, 1993.
- [5] A. Saudi, J. Sulaiman, and M. Hijazi. Robot Path Planning with EGSOR Iterative Method using Laplacian Behaviour-Based Control (LBBC). In *Proceedings of 2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, pp. 87–92, 2014.