[計測自動制御学会論文集
Vol.38, No.11, 996/1002 (2002)]

グラフ上の反応拡散方程式を用いた環境探索経路計画†

市川圭輔*・Trevai CHOMCHANA*・太田順*・湯浅秀男**
深澤佑介*・新井民夫*・淺間一***

Region Exploration Planning for a Mobile Robot Using Reaction-Diffusion Equation on a Graph†

Keisuke ICHIKAWA*, Trevai CHOMCHANA*, Jun OTA*, Hideo YUASA**,
Yusuke FUKAZAWA*, Tamio ARAI* and Hajime ASAMA***

In this paper, region-exploration planning algorithm is proposed for a mobile robot to measure shape and pose of several objects in a restricted working environment. The exploration task is modeled as a problem of generating minimal-cost path, in which a robot goes through several sensing positions that satisfy the following condition: any point in a working environment should be within a fixed distance from at least one corresponding sensing position. Both the number of the sensing positions and the path length should be minimized. The proposed algorithm has two characteristics; efficiency in calculation cost and adaptability to dynamic environmental changes. It can be realized with the combination of (a) distributed sensing-position arrangement algorithm by using a reaction-diffusion equation on a graph, and (b) generation of a Hamiltonian cycle that connects all sensing positions. The sensing positions dynamically change their locations in accordance with the recognized environmental situation. The calculation cost for path generation is shown to be $O(N^{1.5})$, where N is the number of the sensing positions. The effectiveness of the proposed method is shown by simulations. Experiments are also made with a real robot in indoor environment with three objects.

Key Words: region exploration, mobile robot, reaction-diffusion equation, path planning

1. 序　論

自律移動ロボットにとって特定の領域を掃引する作業は非常に重要である．領域内における未知物体の探索作業，ビルの監視作業，床面の清掃・塗装などさまざまなアプリケーションを有する．これらの作業をロボットが行なう場合，作業遂行の保証および作業前には把握していなかった未知障害物発見などによる環境変化への迅速な対応が必要となる．

ロボットのセンシング範囲のようなある一定の領域により作業環境全体を覆い尽くす作業は，一般的に領域掃引作業と呼ばれる．領域掃引作業におけるロボットの動作手法は，反射行動型と計画行動型の2つに大別できる．反射行動型とは，あらかじめ持っている要素行動から状況に応じて適切な行動を選択することで作業を実現するものである．この手法は原理的に要素行動を選択するだけなので，行動を起こすのに要する時間は一般に短い．しかし，局所的な情報に基づいて行動を選択することになるので，その結果として生成される行動シーケンスの最適性は保証できない．これに対して計画行動型とは，作業全体を見据えて一連の行動手順を決定する手法である．こちらは，行動を起こすのに要する時間は増加するものの，計画時点で判明している環境モデルに対して作業の遂行可能性や最適性を保証することができる．

領域掃引作業については，これら二つの行動規範に基づきさまざまな研究が行なわれてきた．反射行動型のロボットを用いて鉄道車両の清掃を扱った坂井ら[1]の研究では，車両の形状が複雑になるにつれて清掃されない領域が増加してしまうという問題が生じた．作業遂行の保証が必要な場合には，計画行動型の手法を用いるのが一般的である．Lumelskyら[2]や，Caoら[3]はあらかじめロボットの行動を計画し，未知障害物の発見などによって計画が破綻した場合には反射行動により障害物を回避するという手法を用いて領域掃引作業を実現した．しかし，反射行動による回避の仕方が必ずしも適切でない場合があり，ロボットの走行距離が長くなり探索

† 第19回日本ロボット学会学術講演会で一部発表（2001・9）
* 東京大学大学院工学系研究科　東京都文京区本郷7-3-1
** 東京大学大学院工学系研究科　東京都文京区本郷/理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター（併任）名古屋市守山区大字下志段味字穴ヶ洞
*** 理化学研究所
* The University of Tokyo　Bunkyo-ku, Tokyo
** Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo / Bio-mimetic Control Research Center, The Institue of Physical and Chemical Research, Anagahora, Shimo-shidami, Moriyama-ku, Nagoya
*** The Institue of Physical and Chemical Research
(Received May 7, 2002)

効率が悪化することがあるという問題点があった．この探査における冗長さをなくすために，いったん計画した経路での作業遂行が不可能になった場合に，経路を再計画する手法が提案されている．González ら[4]や Gabriely ら[5]は領域全体を正方形に分割し，その正方形の領域を順番に通ることにより領域掃引作業を実現させた．González らの手法は，未知障害物を発見した際に領域を分割し直すが，障害物の数や形状によってはかえって探索効率が悪くなる場合がある．また倉林ら[6]は，障害物発見により当初計画していた経路が走行不可能となった場合，今までに通過していない経路（曲線分）を連結する巡回経路を求めることで経路再計画を行なった．しかし，経路を構成する曲線分をグラフでモデル化する際，計算量がノード数に対して指数関数的に増加するという問題点が生じた．

以上より，従来の領域掃引作業研究の問題点を列挙する．

（1） ロボットの行動決定に要する計算量の増加

（2） ロボットの冗長な動作による探索効率の低下

上記二つの問題点を同時に解決可能な領域掃引作業の経路計画手法は，これまで提案されていない．われわれは，環境の変化にロボットが柔軟に対処し，環境探索を迅速かつ効率良く実現することが重要であるという立場を取る．

そこで本論文では，つぎの方法により上記二つの課題を克服し，環境の動的な変化に対応可能な領域掃引経路生成手法を構築する．まず掃引すべき領域に，ロボットが周囲を観測すべき地点（以下センシング地点）をまんべんなく配置し，それらの地点を中心とするセンシング範囲で掃引すべき領域を覆う．その後にそれらのセンシング地点を結ぶ経路を計画することにより，領域掃引作業を実現する．センシング地点を配置する方法として，湯浅ら[7]によって提案されたグラフ上の反応拡散方程式を用いる．すなわち，各センシング地点を局所的な情報のみにより移動させ，その結果として掃引領域に均質な配置を実現する．この方法は変動前の情報を有効に利用するため，物体の新設や移動，除去といった環境の変動による経路再計画が必要となる状況に有効である．さらに，経路計画法としては得られる解が準最適でも計算量の少ない方法を採用する．これらにより，上記問題点（1）を解決する．同時に分散したセンシング地点を短い経路で結ぶ問題は巡回セールスマン問題となるので，すでに多くの有効な解法が存在する．それを利用することにより，環境に対して質の良い準最適な領域掃引作業を短時間で計画できる．これにより，上記問題点（2）を解決する．

2. 問題設定

本章では環境探索のための経路計画問題（以下，探索経路計画問題）の定式化を行なう．本論文における経路は，一般的には掃引経路とよばれる部類に属する．しかし，本論文では，ロボットのセンシング範囲を用いて環境を覆うという立場から，環境探索経路，または単に探索経路と記述する．

2.1 本研究における仮定

定式化を行なうにあたって，以下の仮定を置く．

作業環境に関する仮定

- 探索作業の対象となる領域（以後，探索作業対象領域 W）は，2次元の有界閉空間とする．
- 探索作業対象領域 W の外形は既知とする．
- 探索作業対象領域 W 内には複数個の障害物が存在し，その一部あるいはすべての形状，位置・姿勢は未知である．
- 探索作業対象領域 W のうち，障害物を除いた探索可能な領域を探索可能領域 W_s とする．

ロボットに関する仮定

- ロボットは全方向に移動可能であるとする．
- ロボットは自己位置の同定が可能であるとする．
- ロボットの形状は，半径 R_{robot} の円形とする．
- ロボットのセンシング範囲 S_{sen} は，ロボットの中心から半径 r_s の円形の範囲とする．
- ロボットは，センシング範囲に一部が含まれる未知障害物の形状，位置・姿勢情報を得ることができるとする．

ここで最後の仮定については，障害物にマークおよびバーコードを貼ることで実現する．ロボットは障害物上に貼られたマークを観測することで，その障害物との相対位置・姿勢を計測する．バーコードには，その障害物の形状情報を書き込む．詳しくは5章で述べる．

2.2 探索経路計画問題の定式化

本節では，探索経路計画問題の定式化を行ない，その作業を遂行するための環境探索経路の定義を述べる．

ロボットは特定の地点で周囲をセンシングし，そのセンシング範囲 S_{sen} 内の情報を得る．想定する探索可能領域 W_s 全体をセンシング範囲で覆うようにセンシング地点を配置し，それを順番に通ることによって探索作業を遂行する．

ロボットを円形と仮定したことにより，コンフィグレーション空間 C および自由区間 C_{free} は2次元平面内の有界閉領域となる．コンフィグレーション q としては，ロボットの位置 p のみを考慮すれば良い．

センシング地点 p_i $(i = 1, 2, \ldots, N)$ は，つぎの（1），（2）式を満たさなければならない．ただし，N はセンシング地点の総数である．

$$\forall p_s \in W_s,\ \exists i \in \{1, 2, \ldots, N\}, \mathrm{s.t.}, ||p_s - p_i|| \leq r_s \quad (1)$$

$$\forall i \in \{1, 2, \ldots, N\},\ p_i \in C_{free} \quad (2)$$

よって，探索すべき経路は，（1），（2）式を満たす p_i $(i = 1, 2, \ldots, N)$ を通るハミルトン閉路となる．ただし，実際にロボットが移動する経路 $p(t) : [0, 1] \rightarrow C_{free}$ は $p(0) = p(1) = p_{\tau_1}$，$p((i-1)/N) = p_{\tau_i}$ $(i = 2, \ldots, N)$ を満たす連続写像である．ここで，τ は各 p_i を巡回する順序を決定する $\{1, 2, \ldots, N\}$ に対する置換である．また経路 $p(t)$ は $t = 0$ で巡回を開始し $t = 1$ で初期位置に戻るが，t

は必ずしも時間を意味するパラメータではないことに注意して欲しい．さらに，経路が二つに分離してしまうといった，ハミルトン閉路を構成できないような探索可能領域 W_s は考えないものとする．

したがって，求めるべき探索経路は（1），（2）式を満たすできるだけ少ないセンシング地点 p_i $(i = 1, 2, \ldots, N)$ を通るハミルトン閉路のうち，できるだけ短い実探索経路 $p(t)$ を実現する閉路となる．

3. 環境探索経路計画

3.1 システムの挙動設計

ここでは，システムの状態をセンシング地点の配置パターンに対する関数と見なし，その関数の挙動をポテンシャル汎関数を持つ勾配系により設計する．設計指針は，センシング地点の配置を評価する（小さいほど良いとする）汎関数を設計し，それを極小化する勾配系に従いセンシング地点を自律分散的に移動させるというものである．そのようなセンシング地点の挙動は構成したポテンシャル汎関数を微分することによって得られ，システム全体の挙動は時空間発展方程式系によって定式化される．これにより，各センシング地点が自律的に挙動するにもかかわらず，システム全体は目標とする状態（センシング地点が均等に配置された状態）を達成する．この方法は，新しく障害物を発見してセンシング地点の再配置が必要となった時，障害物の周辺にあるセンシング地点のみを移動させ，効率良く再配置する方法となる．この設計指針に基づき，2章で定義した経路生成を行なう．

3.2 環境探索経路計画

センシング地点の配置は，各センシング地点の位置を中心とするロボットのセンシング範囲 S_{sen} によって領域全体を覆えなければならない（(1) 式）．これはある領域を円で覆う被覆問題となる．しかし，最も少ない円による被覆問題を厳密に解くことは困難であり，現在でも研究途上にある[8]．まして，未知障害物の発見等によって被覆領域が変化する問題に対して厳密解を得ることは，事実上不可能と言える．よって本稿では，この被覆問題を近似的に解くことにする．具体的には，以下の二段階にわける．

（1） センシング地点を等間隔に配置する．

（2） 得られたセンシング地点の配置が，S_{sen} によって探索可能領域 W_s を完全に被覆するかどうかを判定する．

まず，条件（1）について評価する関数を構成する．各センシング地点をノードと見なし，お互いのセンシング領域が重なる $2r_s$ 以内にあるセンシング地点をアークで結ぶことにより，センシング地点の配置状況をグラフ表現する．もし領域が無限に広い2次元平面ならば，センシング地点の等間隔均等配置は正三角形を敷き詰めた配置となる．したがって，センシング地点間の目標距離を $r_0 = \sqrt{3} r_s$ とし，各センシング地点における局所的な配置状況がそのような配置となることを目標とする．そこで，センシング地点（ノード）u での

(a) Small scalar function (b) Large scalar function

Fig. 1 Scalar function

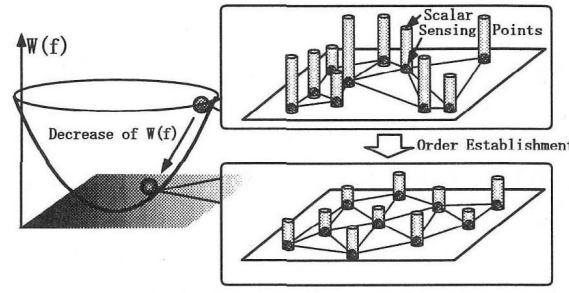


Fig. 2 Change of potential and state

配置状況を評価する関数 $f(u)$ を，

$$f(u) = \sum_{e \in E(u)} |r_e - r_0| \tag{3}$$

と設計する．ここで，$E(u)$ はノード u の切断，すなわちノード u に接続しているアークの集合であり，r_e はアーク e の長さである．ただし，初期配置などでセンシング地点が非常に込み合っている状況では，アークの数が無駄に多くなってしまう．これを避けるために，$E(u)$ は長さの短い順に10個以内のアークのみを含むように制限した．このように設計した関数値 $f(u)$ が小さいほど，センシング地点 u の近傍での配置は目標状態に近いといえる．逆に $f(u)$ が大きいほど，目標状態から離れている（**Fig. 1**）．

つぎに，センシング地点全体の目標配置を，各センシング地点での関数値 $f(u)$ が一様に小さい配置とする．“小さき”の指標として（4）式を用い，“一様”であることの指標として（5）式を用いる．センシング地点の配置全体を評価する汎関数を，それらの和として（6）式のように設計した（**Fig. 2**）．

$$W_0(f) = \sum_{u \in V} f(u)^2 \tag{4}$$

$$W_1(df) = \sum_{u \in V} \| \boldsymbol{df}(u) \|^2 \tag{5}$$

$$W(f) = W_0(f) + W_1(df) \tag{6}$$

ここで V はすべてのノード（センシング地点）の集合であり，df は関数 f の余微分である[9]．また，$\boldsymbol{df}(u)$ はノード u につながるアークにおける余微分を集めたベクトル $\boldsymbol{df}(u) = (df(e))_{e \in E(u)}$ を表わす．

つぎに，この評価値 $W(f)$ を減少させるように，各センシング地点の挙動設計を行なう．このためにはつぎの二つを算出する必要がある．

・センシング地点の移動方向

・センシング地点の移動距離

以下，これらの算出方法について述べる．

3.2.1　移動方向の算出

関数 f はグラフ上で定義されているが，ノード u に対応するセンシング地点が動くと接続するアークの長さが変化するため $f(u)$ の値も変化する．ノード u に対応するセンシング地点の位置を原点としたとき，それが $\boldsymbol{x}$ 移動したときの関数 $f(u)$ の変化を近似する関数 $g_u(\boldsymbol{x})$ は，

$$g_u(\boldsymbol{x}) = \sum_{e \in E(u)} \left| \boldsymbol{r}_e - \boldsymbol{x} - r_0 \frac{\boldsymbol{r}_e - \boldsymbol{x}}{||\boldsymbol{r}_e - \boldsymbol{x}||} \right| \qquad (7)$$

となる．ただし，$\boldsymbol{r}_e$ はノード u を原点とする局所座標系でのアーク e の先端の位置ベクトルである．この $g_u(\boldsymbol{x})$ は，$f(u) = g_u(\mathbf{o})$ を満たしていることを確認していただきたい．$g_u(\boldsymbol{x})$ を $\boldsymbol{x}$ で偏微分し $\boldsymbol{x} = \mathbf{o}$ とすることにより（(8) 式），$f(u)$ を最も減らすことのできるセンシング地点の移動方向 $\boldsymbol{e}_{move}(u)$ が求まる（(9) 式）．

$$\nabla g_u(\mathbf{o}) = \frac{1}{g_u(\mathbf{o})} \sum_{e \in E(u)} \left(1 - \frac{r_0}{||\boldsymbol{r}_e||}\right) \frac{\boldsymbol{r}_e}{||\boldsymbol{r}_e||} \qquad (8)$$

$$\boldsymbol{e}_{move}(u) = \frac{\nabla g_u(\mathbf{o})}{||\nabla g_u(\mathbf{o})||} \qquad (9)$$

3.2.2　移動距離の算出

つぎに各センシング地点の移動すべき距離を算出する．センシング地点 u の移動距離 $D(u)$ は，$f(u)$ の時間変化がポテンシャル汎関数 $W(f)$ の勾配に比例するように，すなわち関数 f の挙動が（10）式に示す勾配系となるように決定する．

$$\frac{\partial f}{\partial t}(u) = -\frac{\delta W(f)}{\delta f}(u) = -2f(u) - 4\sum_{v \sim u}(f(u) - f(v)) \qquad (10)$$

ここで，$v \sim u$ はノード v が u とアークでつながっていることを表わす．この（10）式は，グラフ位相上での反応拡散方程式と見なすことができる．移動距離 $D(u)$ は，先に求めた $\nabla g_u(\mathbf{o})$ を用いると（11）式のように求まる．

$$D(u) = \frac{\partial f}{\partial t}(u) \frac{1}{||\nabla g_u(\mathbf{o})||} \qquad (11)$$

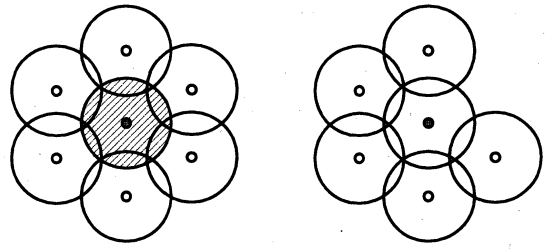
これらより，ノード u に対応するセンシング地点の一単位時間刻みでの移動ベクトル $\boldsymbol{v}_{move}(u)$ は，(12) 式となる．

$$\boldsymbol{v}_{move}(u) = D(u) \cdot \boldsymbol{e}_{move} = \frac{\partial f}{\partial t}(u) \frac{\nabla g_u(\mathbf{o})}{||\nabla g_u(\mathbf{o})||^2} \qquad (12)$$

この移動ベクトル $\boldsymbol{v}_{move}(u)$ にしたがい各センシング地点が移動する場合，センシング地点全体の配置はポテンシャル汎関数 $W(f)$ を極小とする配置（すなわち目標配置）へと向かう．

3.2.3　センシング地点の挙動と計算量

(7) 式，(10) 式，(12) 式から，センシング地点の挙動は，近傍のセンシング地点との距離 r_e，自分自身の関数値 $f(u)$，および近傍のセンシング地点での関数値 $f(v)$ によって決定される．たとえ環境が変化しても，1つのセンシング地点が相互作用すべき近傍のセンシング地点の数は10を越えないので，各センシング地点の移動にかかる計算量（$\boldsymbol{v}_{move}(u)$ を算出するのにかかる計算量）は増加しない．



(a) Covered situation　　(b) Non-covered situation

Fig. 3　Judgment of covering

環境中に存在する障害物を，そこから一定の間隔をとってセンシング地点を配置すべき対象と見なすことにより，ほかのセンシング地点と同様に扱うことができる．障害物を各頂点とそれを結ぶ辺として表現し，障害物の各辺から一定の距離を置くようにセンシング地点を配置すれば良いので，本手法はさまざまな形状の障害物を扱うことができる．

3.2.4　センシング地点数の増減と経路生成

上記の方法により得られたセンシング地点配置が，センシング範囲 S_{sen} によって探索可能領域 W_s を完全に被覆しているかどうかはまだわからない．よって，得られたセンシング地点配置により W_s が完全に被覆されているかどうかの判定を行なう必要がある．

その判定方法とは，各センシング地点のセンシング半径 r_s が描く境界が，すべて隣接するセンシング地点におけるセンシング範囲または障害物によって覆われていることである（**Fig. 3**）．覆われていない場合には，近傍に新たなセンシング地点を追加する．

最後に，そのように配置したセンシング地点のロボットが通過すべき順番を決定する．ここで生成する経路は，各都市を一度だけ訪れる最短経路を求める巡回セールスマン問題（Travelling Salesman Problem：以下 TSP と略記）を解くことにより得られる．ここでは，アニーリング法[10]を用いて TSP を解き，準最適な経路の生成を行なう．

障害物の存在に対しては以下のように対処する．本来は，障害物があって最短距離で通過不可能なセンシング地点間の経路長は，C 障害物の頂点を経由し，障害物を回避した経路長とすべきである．しかし，アニーリング法によって経路をランダムに繋ぎかえる間，常に C 障害物を生成するのは計算量の増加を招いてしまう．よって，ここでは，つぎの二段階の手法にわけて障害物存在下における経路生成を行なう．

（1）障害物の存在を考慮せず，アニーリング法により TSP を解く．

（2）解いた TSP の経路が C 障害物内を通過する場合（**Fig. 4** における点線）には，C 障害物の頂点を経由した経路（Fig. 4 における実線）を生成する．

これにより，経路生成にかかる計算量を減少させ，準最適

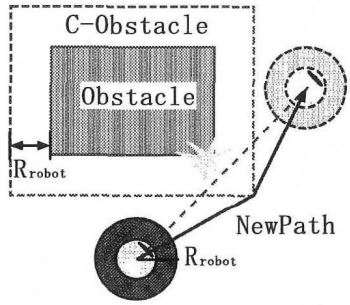


Fig. 4 Path refinement caused by obstacle

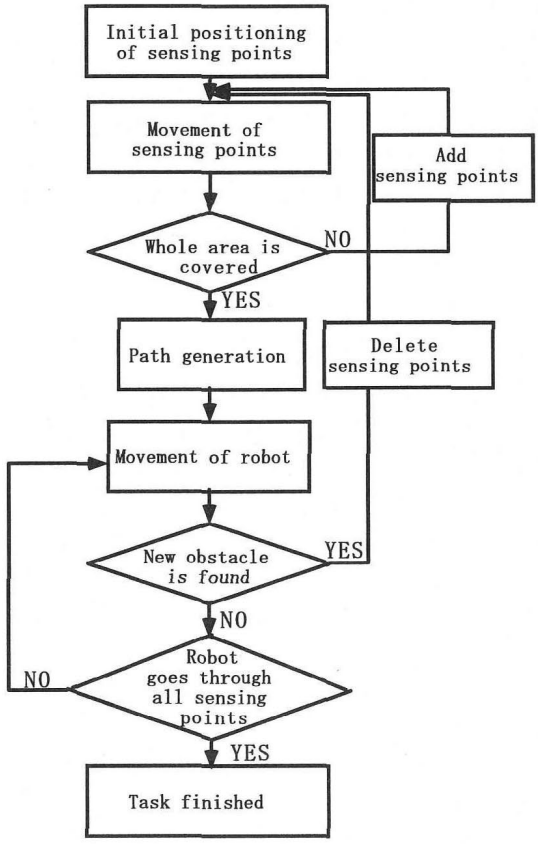


Fig. 5 Flow chart of the proposed algorithm

な解を得ることができる．

本手法全体の手順を，**Fig. 5** に示す．

4. 経路生成シミュレーション

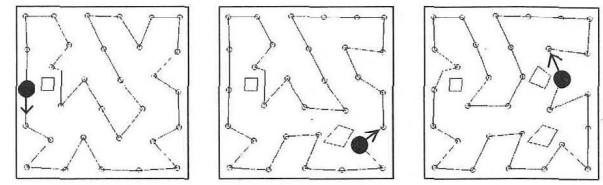
本章では，提案手法をシミュレーションすることによって，センシング地点の配置および経路生成が適切なものであることを例示する．また，本手法が計算量，探索効率の点で従来の手法に対して優位性があることを示す．

4.1 計算量の評価

本節では，経路生成に要する計算量を議論する．

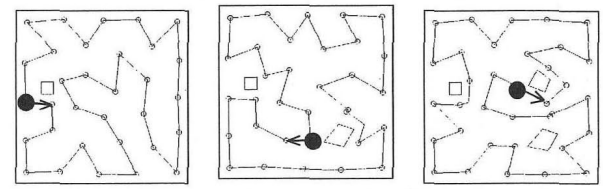
本手法において，各センシング地点は近傍とのみ相互作用をするので，総センシング地点数 N が増えた場合にも，各センシング地点の移動に要する計算量は変化しない．よって，すべてのセンシング地点を配置するのに要する計算量，およびアニーリングによる TSP の解法に要する計算量は，それぞれ $\mathcal{O}(N)$ となる．新しいセンシング地点が付加されたり消滅したりすることにより各センシング地点は移動するので，全体の配置が落ち着くまでの時間（計算量）も見積もる必要がある．センシング地点の挙動が反応拡散方程式にしたがうことからもわかるように，この時間は 2 次元気体が平衡状態にいたるのに要する時間と同じと考えられる．その時定数は波数に比例の 2 乗に比例することが知られており[12]，ノードが 1 次元的に結合する最悪の場合でも収束に要する時間のオーダは $\mathcal{O}(N^{0.5})$ である．両者を考え合わせると，経路生成に要する計算量のオーダは $\mathcal{O}(N^{1.5})$ 以下であると言える．

すなわち本手法は，領域の増大に対しても計算量の増加を抑えることができる有効な手法である．



(a) 1st obstacle (b) 2nd obstalce (c) 3rd obstacle

Fig. 6 Path using proposed algorithm



(a) 1st obstacle (b) 2nd obstacle (c) 3rd obstacle

Fig. 7 Path using fixed-point algorithm

4.2 探索効率の評価

提案手法の有効性を評価するために，比較対照としてセンシング地点を移動させない手法を実装し，両者を比較した．

後者の手法は以下に示す通りである．

- 新たな障害物の発見時に，障害物内部に存在することになるセンシング地点を消去する．
- センシング地点は移動させず，センシング地点の追加を繰り返すことにより探索可能領域 W_s を被覆する．

ロボットのセンシング半径を $r_s = 1.0$[m]，作業対象領域 W を 7.0×7.0[m^2] の正方形領域とし，その中に未知障害物を 3 つ配置した．また，シミュレーションに用いた計算機のスペックは Pentium III：1 [GHz] である．

両手法の経路計画にかかる時間および経路長，センシング地点数を比較した．本手法を用いた場合の経路の変化を **Fig. 6** に，追加のみの手法を用いた場合の変化を **Fig. 7** に示す．

以下のことがわかった．

- Fig. 6 に示すように，提案手法において，センシング地点は時間の経過とともに近傍のセンシング地点と一定の距離を取るように移動している．また，正確な被覆完了

Table 1 Comparison of CPU time

	1st	2nd	3rd
proposed method ($\times 10^{-2}$[s])	3.70	10.00	5.80
fixed-point method ($\times 10^{-2}$[s])	8.10	5.10	7.80

Table 2 Comparison of path length

	1st	2nd	3rd
proposed method ($\times 10^{3}$[m])	4.43	4.37	4.39
fixed-point method ($\times 10^{3}$[m])	4.41	4.41	4.53

Table 3 Number of sensing positions

	1st	2nd	3rd
proposed method	31	31	31
fixed-point method	32	33	35

判定，および適切な経路生成ができていることがわかる．一方比較対照手法はFig. 7からセンシング地点が不均等に配置されていることがわかる．

- 計算時間の観点からは，二つの方法に際立った差がない（**Table 1**）．
- 新たな障害物を発見する度に提案手法の有効性が増す．これは新たな障害物を発見した時，提案手法ではセンシング地点の個数が増大しないのに対して，比較対照手法の場合は増加の一途を辿っていることによる．
- 結果として，三つめの障害物発見時には，提案手法は比較対照手法より総経路長で約3%（**Table 2**），総センシング地点数で約10%減少した（**Table 3**）．

これらの結果より，提案手法が変動する環境下で効率良く質の良い経路を生成することがわかった．

なお提案手法は，新しい障害物を発見する度に経路を一からつくり直す仕様になっている．それまでに環境内で探索した領域を考慮してそれ以外の領域を優先的に探索する方法にも拡張可能である．ただしその場合には，いくつか分離された領域を連結する経路を算出する必要があるため，TSPに相当する部分の計算量がより増大する可能性がある．

5. 環境探索実験

本手法が実環境に適用可能であることを示すために，実機を用いた環境探索実験を行なった．

5.1 実験システム

ここでは，2章で仮定した“ロボットはセンシング範囲に入った未知障害物の情報を得る”ことを実環境下で実現する手法を示す．本実験では，障害物にマークを張り，中心にバーコードを張る（**Fig. 8**）．ロボットはマークを発見しその四頂点情報から障害物との相対位置を計測する．また，マーク内部に張られているバーコード情報から物体情報を読み取り，その障害物形状をデータベースから取得する．

バーコードにはQRコードを用い，読み取り装置にはKEYENCE製TL-600を用いた．ロボットのセンシング半径r_sは1[m]，未知障害物とロボットが干渉しないように障害物には0.60[m]間隔でマークを貼った．センサとしてSONY製CCDカメラEVI-D30を用いた．また，ロボットは理化学研究所製全方向移動ロボットZEN[11]を用いた．

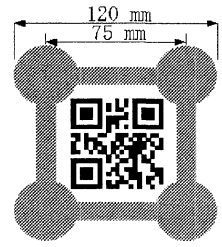
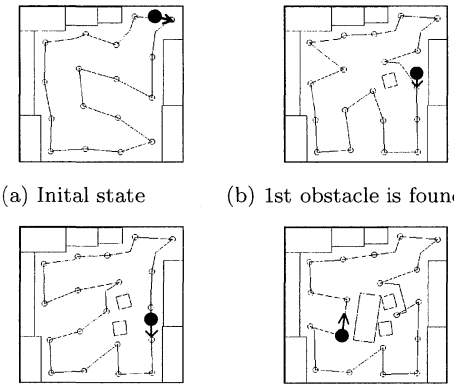


Fig. 8 Shape of mark



(a) Inital state (b) 1st obstacle is found

(c) 2nd obstacle is found (d) 3rd obstacle is found

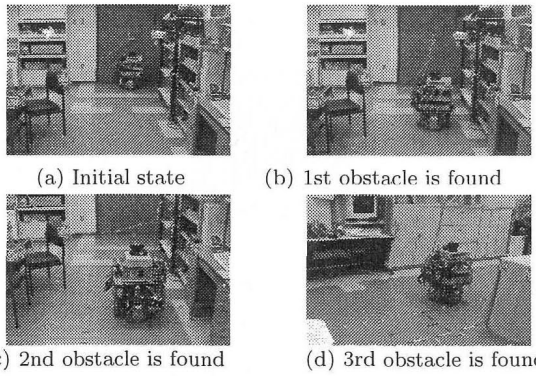
Fig. 9 Region exploration process

5.2 環境探索実験

これらの実験システムを用いて，約6[m]四方の実環境下で環境探索実験を行なった．ロボットは移動中にランドマークを用いて自己位置補正を行ないながら環境地図を作成した．ただし，ランドマークはマークと同じ形状で，その位置をロボットはあらかじめ把握している．作成した環境地図を**Fig. 9**に，環境中を移動する様子を**Fig. 10**に示す．Fig. 9中の黒丸はロボットが障害物を発見した位置を表わしている．Fig. 9より，未知障害物の発見による環境変化に対応した経路生成の様子がわかる．ロボットの観測結果と障害物の実際位置とのずれは最大0.22[m]であり，姿勢のずれは最大17[deg]であった．この誤差はマーク観測誤差，ロボット走行誤差が原因であると考えられるが，ロボットが探索走行するのに十分な精度が得られていることがわかる．また，経路生成に要する時間は数十ミリCPU秒程度（Pentium III：1[GHz]）であり，十分実用的な時間であると言える．これより提案手法が実機，実環境にも適用できることがわかった．

6. 結　論

本論文では，グラフ上の反応拡散方程式を用いてセンシング地点を配置することにより，環境探索経路生成を行なった．これにより経路の再計画にかかる時間を減らし，探索効率の良い環境探索経路生成手法を構築した．実環境において位置・



(a) Initial state (b) 1st obstacle is found

(c) 2nd obstacle is found (d) 3rd obstacle is found

Fig. 10 Process of region exploration

姿勢が未知である可動物体の存在に対処し，環境内を巡回するのに必要な精度の経路を得ることができた．

今後の展望としてはマークやランドマークの観測誤差，ロボットの走行誤差を考慮したセンシング地点の配置，群ロボット系への拡張が挙げられる．

参 考 文 献

1) 坂井，下山，三浦：反射行動を利用した自律清掃ロボットの研究，第14回日本ロボット学会予稿集，313/314 (1996)
2) V. Lumelsky, S. Mukhopadhyay and K. Sun: Sensor-Based Terrian Acquisition: a Seed Spreader Strategy, IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and System, 62/67 (1989)
3) Zuo Liang Cao, Yuyu Huang and Ernest L. Hall: Region Filling Operations with Random Obstacle Avoidance for Mobile Robots, Journal of Robotic Systems, **5**-2, 87/102 (1988)
4) E. González, A. Suárez, C. Moreno and F. Artigue.: Complementary Regions: a Surface Filling Algorithm, Proceedings of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 909/914 (1996)
5) Yoav Gabriely and Elon Rimon: Spanning-Tree Based Coverage of Contiuous Areas by a Mobile Robot, Proceedings of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1927/1933 (2001)
6) 倉林，太田，新井，吉田：掃引作業における移動ロボット群の動作計画，日本ロボット学会誌，**16**-2, 181/188 (1998)
7) 湯浅，伊藤：グラフ上の反応拡散方程式と自律分散システム，計測自動制御学会論文集，**35**-11, 1447/1453 (1999)
8) J.B.M. Melissen and P.C. Shuur: Covering a rectangle with six and seven circles, Discrete Applied Mathematics, **99**, 149/156 (2000)
9) 浦川 肇：ラプラス作用素とネットワーク，73, 裳華房 (1996)
10) W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery 著，丹慶，奥村，佐藤，小林 訳：NUMERICAL RECIPES in C, 330/338, 技術評論社 (1993)
11) 淺間，佐藤，嘉悦，尾崎，松元，遠藤：3自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発，日本ロボット学会誌，**14**-2, 249/254 (1996)
12) L.E. Reichl 著，鈴木増雄 監訳：現代統計物理（上），158/160, 丸善 (1983)

[著 者 紹 介]

市 川 圭 輔

2000年慶応大学理工学部物理学科卒業．同年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了．現在ソニー（株）にてXML関連技術の開発を担当．

Trevai CHOMCHANA

2001年電気通信大学電気通信学部機械制御工学科卒業．同年東京大学大学院工学系研究科修士課程入学．現在に至る．群ロボットの研究に興味を持つ．

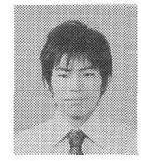
太 田 順（正会員）

1989年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了．同年新日本製鐵（株）入社．91年東京大学工学部助手．94年同講師．96年より東京大学工学系研究科助教授．この間，96年～97年スタンフォード大学客員研究員．群知能ロボット等の研究に従事．博士（工学）．

故 湯 浅 秀 男（正会員）

1986年名古屋大学院博士前期過程修了．助手を経て，92年名古屋大学工学部講師．93年理化学研究所フロンティア研究員を併任，99年東京大学工学系研究科助教授．2002年9月18日没．システム理論，ロボット工学の研究に従事．博士（工学）．

深 澤 佑 介



2002年東京大学工学部精密機械工学科卒業．同年東京大学大学院工学系研究科修士課程入学．現在に至る．群ロボットの研究に興味を持つ．

新 井 民 夫（正会員）

1970年東京大学工学部精密機械工学科卒業．77年同博士課程修了．工学博士．87年東京大学工学部精密機械工学科教授．2000年東京大学人工物工学研究センターセンター長（併任）．自動組立，複数移動ロボットなどの研究に従事．IEEE，CIRPなどの正会員．

淺 間 一（正会員）

1984年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了．86年より理化学研究所に勤務し，現在工学基盤研究部副主任研究員．自律分散型ロボットシステムにおける協調・適応技術，知的データキャリアとその応用技術の開発等に従事．2001年日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門学術業績賞等受賞．工学博士．