SPM 法による経路計画と移動ロボットシステムへの応用

正員 内田 雅文 (青山学院大)

正員 井出 英人 (青山学院大)

Path Planning by SPM Method and its Application to Mobile Robot System

Masafumi Uchida, Member, Hideto Ide, Member (Aoyamagakuin University)

An autonomous robot must have a real-time path plan satisfying environmental changes and unknown situations. Obstacle avoidance is one of the problems in the path plan. With respect to studies concerning obstacle avoidance, a potential method based on vector analysis and a novel technique based on graph theory have been proposed.

A sensory point moving method is a technique based on a parallel algorithm. This technique has involved a problem on the path planning in the working environment containing the blind alley obstacle.

In this paper, we propose an improvement on renewal rule of a sensory point and path plan based on vector analysis. We developed a mobile robots system using a bird's-eye view. Through the path planning simulation and the application of this technique to a mobile robots system, the effectiveness of the present technique is confirmed.

キーワード：移動ロボット，ポテンシャル法，経路計画，障害物回避

1. はじめに

障害物回避は，ロボットの行動計画において重要な問題である。この問題における先駆的な研究としては，Udupa によるスタンフォード型ロボットアームの障害物回避実現のための自由空間記述がある⁽¹⁾。Lozano-Perez により提案されたコンフィギュレーション空間法は Udupa の空間記述法をより一般化したものである。また，彼らはビジビリティグラフを提案し，グラフ理論に基づく最適経路計画として障害物回避を検討した⁽²⁾⁽³⁾。

障害物回避に対するベクトル解析からのアプローチとしてポテンシャル法が知られている。Laplace 方程式の解を利用したポテンシャル法は，Kim, Khosla らによって検討されたほか⁽⁴⁾，最近では佐藤らの報告もある⁽⁵⁾。この手法におけるポテンシャル場は，環境の離散化要素と速度ポテンシャルとの対応付けによって生成されるが，Trace 処理や要素分割の最適化が不可欠であり，CPU の性能によるところの大きい処理である。反面，この手法による経路計画には，作業環境やロボットの諸特性に対して柔軟性があり，未知で複雑な環境で作業する自律型ロボットの計画には有効な手法といえる。

横山らは，リアルタイムに場を生成する手法としての感覚点移動法とポテンシャル場からロボットの進路を決定する，円形走査検索法からなるポテンシャル法に基づく経路

計画方法を提案した⁽⁷⁾⁽⁸⁾。この経路計画方法は，並列的アルゴリズムに基づきリアルタイムに場を生成できるほか，経路計画器 (Path planner) として単純かつ小規模なシステムで実現できる可能性がある。ただし，感覚点移動法によるポテンシャル場は，ロボットが最短経路をたどるときロボット-移動目標間の距離が単調減少しない領域（以後，これを袋小路領域と呼ぶ）において局所的な高位ポテンシャル領域を形成する特徴がある。このポテンシャル場から円形走査検索法によって経路計画を行うと，袋小路領域において局所的な高位ポテンシャルに起因したデッドロックが生じ，有効な回避経路を得ることができない。また，ポテンシャル場はリアルタイムに得られるものの円形走査検索法は Trace 処理となり，経路計画方法としてのリアルタイム性に問題がある。

本論文では，感覚点移動法における新たな場の生成方法を提案するとともに，ベクトル場の理論を導入した新たな経路計画方法として SPM (Sensory point moving) 法を提案する⁽⁹⁾。この手法によるポテンシャル場は，従来の感覚点移動法と同様に袋小路領域において局所的な高位ポテンシャル領域を形成するものの，感覚点の移動に伴う場の形状の更新によって，この高位ポテンシャル領域が移動する特徴をもっている。この特徴によって袋小路領域におけるデッドロックが解消されることを計算機シミュレーションにより示す。また，多次元環境への拡張の可能性を三次

元環境における経路計画によって示す。鳥観画像を利用した移動ロボットシステムを開発し、複数の移動ロボット間の衝突回避実験によって本手法の動的環境に対する有効性を示す。

2. 感覚点移動法と SPM 法の概要

感覚点移動法は、仮想環境上に配置した複数の仮想センサによる並列処理をコンセプトとしたリアルタイムなポテンシャル場の生成手法である。

〈2・1〉 仮想環境 仮想センサが動作する仮想環境とは、障害物を表す占有領域とそれ以外のロボットが移動可能な領域を表す自由領域からなる計算機上に構成した環境である。仮想環境は、図 1 のように実環境を上部から撮影し、得られる鳥観画像から障害物を抽出することによって容易に形成することができる。鳥観画像からはロボットの位置情報も抽出できる。

仮想環境は、占有領域が-1、自由領域が1となる場によって表現し、(1)式とする。ただし、 x は仮想環境における位置座標とする。

$$y(x) = \begin{cases} -1, & x \in \text{Occupied region} \\ 1, & x \in \text{Free region} \end{cases} \quad (1)$$

〈2・2〉 感覚点移動法とその問題点 仮想環境上で動作する仮想センサは、仮想環境から(1)式のような情報を取得し、簡単なルールに従い出力する機能をもった計算上の感覚器である。感覚点移動法では、仮想センサの機能が以下のように定義されている。

仮想センサ i ($i=0, 1, 2, \dots$) は、時刻 t における入力情報として仮想環境から位置座標 $x_i(t)$ (このパラメータを感覚点と呼ぶ) における $y(x_i(t))$ およびロボットの現在

位置 $x_R(t)$ 、移動目標位置 x_T を取得する。仮想センサ i は、入力情報に対して(2)式に従い $z_i(t)$ を出力する。ここで、 σ_i は出力特性を表すパラメータ、 c_1, c_2 は任意の定数とする。

$$z_i(t) = \frac{\exp\left\{-\frac{c_2|x_R(t) - x_i(t)|^2}{\sigma_i(t)/c_1}\right\}}{\sigma_i(t)/c_1} \quad (2)$$

(2)式を x_R の関数とすると、 z_i は $x_R = x_i$ で最大となる正規分布状の場合 $z_i(x_R)$ を形成していることになる。各仮想センサは、各々独立に(3)、(4)式に従い $x_i(t)$ 、 $\sigma_i(t)$ を更新し、 $z_i(x_R)$ の形成を変化させる。ただし、 $\Delta x_i(t)$ 、 $\Delta \sigma_i(t)$ は時刻 t における x_i 、 σ_i の更新量を表す。

$$\begin{aligned} \Delta x_i(t) = & \sum_j \{x_j(t) - x_i(t)\} \Phi_0[y\{x_i(t)\}, y\{x_j(t)\}] \\ & \times \exp\{-|x_j(t) - x_i(t)|^4\} \exp\{-\sigma_i(t)\} \\ & + \{x_T - x_i(t)\} [1 - \exp\{-\sigma_i(t)\}] \\ & \times \exp\{-|x_T - x_i(t)|^2 \sigma_i^{-1}(t)\} \\ & + \{x_R(t) - x_i(t)\} [1 - \exp\{-\sigma_i(t)\}] \\ & \times \exp\{-|x_R(t) - x_i(t)|^2 \sigma_i^{-1}(t)\} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\Phi_0(a, b) = \begin{cases} -1 & (a=1 \text{ and } b=1) \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta \sigma_i(t) = \begin{cases} \{2 + z_i(t)\} z_i(t) \sigma_i(t) & y\{x_i(t)\} = -1 \\ [\exp\{-|\Delta x_i(t)|^2\} [1 - \exp\{-|x_R(t) - x_i(t)|^2\}]] z_i(t) - 1) \sigma_i(t) & \dots (5) \\ \text{otherwise} \end{cases}$$

(3)式は、 x_i の更新を $x_j - x_i$ ($j=1, 2, \dots, i, \dots$)、 $x_R - x_i$ 、 $x_T - x_i$ によって定義している。すべての感覚点は、(3)式右辺第1項により自由領域へ移動すると同時に、第2項、3項によって線分 $x_R x_T$ 周辺に集まることになる。感覚点移動法では、各仮想センサが形成する場の総和 Z をポテンシャル場と定義する。

$$Z\{x_R\} = \sum_i z_i\{x_R\} \quad (6)$$

従って、この手法によるポテンシャル場は、 $x_R(t)$ において x_T 方向のポテンシャルが常に高位になる特徴がある。その結果、 $|x_T - x_R(t)|$ が t に対して単調減少する経路は計画できるものの、袋小路領域において必要な $|x_T - x_R(t)|$ が増加する経路は計画できないことになる。

経路計画は生成されるポテンシャル場をもとに $x_R(0)$ から $x_R(t)$ を順次検索し、時刻 t_T で $x_R(t_T)$ が x_T に十分に接近したときの(7)式として得ることができる。

$$\{x_R(0), x_R(1), x_R(2), \dots, x_R(t_T), x_T\} \quad (7)$$

横山らの経路計画方法では、ポテンシャル場から $x_R(t)$ の検索方法として円形走査検索法を提案している。円形走査検索法では $x_R(t)$ を中心とする円周上のポテンシャルを走査して、円周上の最高位ポテンシャルを検索し、 $x_R(t+1)$ を決定している。

〈2・3〉 SPM 法の概要 前節で指摘した問題点を解決するために、本節では感覚点移動法において仮想センサの機能を新たに定義し、従来の感覚点移動法と区別するためにロボットの進路決定方法を含めた新たな経路計画手法

図 1 仮想環境の形成

Fig. 1. The generation of virtual environment.

として SPM 法を提案する。

仮想センサ i の出力関数を (8) 式と定義する。感覚点移動法における出力関数と異なり、(8) 式による仮想センサは $y\{x_i(t)\}$ により $x_i(t)$ が占有領域にあるとき負の場を形成する。従って、 $x_i(t)$ の更新なしに占有領域のポテンシャルを低位に設定することが可能になる。

$$z_i(t) = y\{x_i(t)\} \frac{\exp\left\{-\frac{c_2|x_R(t)-x_i(t)|^2}{\sigma_i(t)/c_1}\right\}}{\sigma_i(t)/c_1} \dots\dots (8)$$

仮想センサは (8) 式に従い出力した後、 $x_i(t)$, $\sigma_i(t)$ を以下のルールに従って更新する。

$$\Delta x_i(t) = \sum_j \Phi_N\{y\{x_i(t)\}, y\{x_j(t)\}\} \times \{1 - \sigma_j(t)^2\} \sigma_i(t) \frac{x_j(t) - x_i(t)}{|x_j(t) - x_i(t)|} \dots\dots (9)$$

$$\Phi_N(a, b) = \begin{cases} -1 & (a=1 \text{ and } b=-1) \\ 0 & (a=-1 \text{ and } b=-1) \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots (10)$$

$$\sigma_i(t+1) = c_1 + z_i^2(t) \dots\dots (11)$$

SPM 法の特徴は、 x_i の更新を x_i が自由領域にある場合、占有領域にある x_j , x_i が $x_R(t)$ 周辺にある場合、自由領域にある x_j によって定義するところにある。図 2 は一次元の仮想環境上で動作する二つの仮想センサ i, j の感覚点 x_i, x_j と、 i, j によるポテンシャル場を基に (12), (13) 式に従い移動するロボットの振舞いを示している。ただし、 x_i, x_j は常に自由領域にあるものとする。

$$\Delta x_R(t) = \begin{cases} 0.01 \sum_{k=i,j} z_k\{x_R(t)\} + 0.01\} \\ -z_k\{x_R(t)\} > 0 \\ -0.01 & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots (12)$$

$$x_R(0) = 0.0 \dots\dots (13)$$

仮想センサの諸パラメータは以下のとおりである。

図 2 自由領域にある二つの感覚点 $x_i(t)$, $x_j(t)$ の振舞い $y\{x_i(t)\}=1$, $y\{x_j(t)\}=1$
Fig. 2. The behavior of two sensory points $x_i(t)$, $x_j(t)$ in the free region.

$$\left. \begin{aligned} x_i(0) &= 0.2, & \sigma_i(0) &= 1.0 \\ x_j(0) &= -0.1, & \sigma_j(0) &= 1.0 \\ c_1 &= 0.6, & c_2 &= 15.9 \end{aligned} \right\} \dots\dots (14)$$

感覚点の更新は、仮想環境上での感覚点の移動と考えることができる。図 2 より x_i, x_j は、自由領域において x_R と一定の距離を保ちながら互いに接近するように移動していることがわかる。 x_R は i, j によるポテンシャル場に従って移動することから、 x_i, x_j は仮想環境上で x_R を先導するように移動する。

移動目標までの経路を得るためには、より高位なポテンシャルが x_T を示す場を生成しなくてはならない。感覚点移動法では、(3) 式のように x_T を感覚点の更新のパラメータにしているが、その結果として袋小路領域への対応が困難になった。SPM 法では、(9), (11) 式を x_T に関する条件の下で適用し、(15), (16) 式とする。ただし、 c_3 は任意の定数とする。 $|x_T - x_i| < c_3$ を満足する x_i はすべて x_T へ移動することから、 x_T のポテンシャルを高位に設定することができる。

$$\left. \begin{aligned} x_i(t+1) &= x_T & |x_T - x_i(t)| < c_3 \\ x_i(t+1) &= x_i(t) + \Delta x_i(t) & \text{otherwise} \end{aligned} \right\} \dots (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i(t+1) &= c_1 & |x_T - x_i(t)| < c_3 \\ \sigma_i(t+1) &= c_1 + z_i^2(t) & \text{otherwise} \end{aligned} \right\} \dots\dots (16)$$

(7) 式において $x_R(t)$ から $x_R(t+1)$ への移動を (17) 式で表す。

$$V\{x_R(t)\} = x_R(t+1) - x_R(t) \dots\dots (17)$$

円形走査探索法では、 $Z\{x_R\}$ から $V\{x_R\}$ への移行を Trace 処理によって行っている。この移行にベクトル場の理論を適用し、(18) 式とすると、仮想センサの出力から $V\{x_R\}$ は一意に決定する。SPM 法では、仮想センサ i の出力関数を改めて $\text{grad } z_i$ と定義し、 $V\{x_R(t)\}$ を各仮想センサ出力の総和として得る。

$$\begin{aligned} V\{x_R(t)\} &= \text{grad } Z\{x_R(t)\} \\ &= \sum_i \text{grad } z_i\{x_R(t)\} \dots\dots (18) \end{aligned}$$

3. 計算機シミュレーションによる経路計画

計算機シミュレーションのための作業環境としては、屋内外を移動する無人搬送車のような自律移動ロボットを対象とした二次元環境と、将来ロボットの主要な活動範囲になるであろう航空・宇宙、海中・海底を想定した三次元環境を考える。二次元環境のシミュレーションは、 $30L \times 30L$ [単位は任意の長さ L (m)] の正方形領域内において $1.5L \times 1.5L$ の正方形領域単位で占有領域および自由領域を表現し、100 個の仮想センサによる経路計画とする。三次元環境のシミュレーションは、 $30L \times 30L \times 30L$ の立方体領域内において $6L \times 6L \times 6L$ の正方形領域単位で占有領域および自由領域を表現し、1,000 個の仮想センサによる経路計画とする。

袋小路領域を含む二次元環境におけるシミュレーション結果を図 3～図 5 に示す。図 3 は経路計画中 $t=1, 14, 27$,

40, 53, 66, 79, 92, 105 における感覚点の配置および $x_R(t)$ の位置を表している。図中の白丸は自由領域にある感覚点, 黒丸は占有領域にある感覚点を, 黒い正方形は $x_R(t)$ である。図 4 は $t=1, 14, 27, 40, 53, 66, 79, 92, 105$ の感覚点配置におけるポテンシャル場を, 等ポテンシャル線を基に

図 3 袋小路領域を含む 2-D 環境における経路計画シミュレーションの結果 (感覚点配置)
Fig. 3. A result of path planning simulation in 2-D environment included the blind alley region (sensory points).

図 4 袋小路領域を含む 2-D 環境における経路計画シミュレーションの結果 (ポテンシャル場)
Fig. 4. A result of path planning simulation in 2-D environment included the blind alley region (potential field).

ポテンシャルの高さを黒く灰く白の順で表現したものである。図 5 は得られた障害物回避経路である。

初期状態において, 感覚点は仮想環境上に均等に配置した。 x_T 周辺の感覚点は, (15)式により移動目標へ移動し, x_T のポテンシャルは常に高位に設定されている。占有領域に感覚点がある仮想センサは負の場を形成することから, 占有領域のポテンシャルが常に低位に設定されている。 $t=1$ において図中上部の占有領域がつくる袋小路領域のポテンシャル場は局所的な高位ポテンシャル領域となり, 感覚点移動法ではデッドロックの原因になる。 $t=14$

図 5 袋小路領域を含む 2-D 環境における経路計画シミュレーションの結果 (障害物回避経路)
Fig. 5. A result of path planning simulation in 2-D environment included the blind alley region (obstacle avoidance path).

図 6 三次元環境における経路計画シミュレーションの結果
Fig. 6. A result of path planning simulation in 3-D environment.

～27においてこの領域にある感覚点は、 $x_R(t)$ の接近とともに袋小路領域から吐き出されるように移動し、局所的な高位ポテンシャル領域も同様に移動している。その結果、 $x_R(t)$ は袋小路領域から脱することができる。図中下部の占有領域による袋小路領域についても、感覚点の配置状況は異なるものの同様である。

図2で示した自由領域における二つの感覚点の接近が、図3では感覚点の局所的な密集（局所感覚点群と呼ぶことにする）として確認できる。特に $t=40\sim79$ の図からは、 $x_R(t)$ を先導するように移動する局所感覚点群が確認できる。図3では確認できないものの、図4から $t=14$ では縦軸23横軸17と縦軸25横軸5付近、 $t=27$ では縦軸25横軸5付近に局所的な高位ポテンシャル領域として $x_R(t)$ を先導する局所感覚点群が形成されつつあることを確認できる。 $t=92\sim105$ での $x_R(t)$ は、(15)式により x_T に集中した感覚点群によって x_T へと誘導されている。

図6は複雑な形状の占有領域を含む三次元環境における経路計画の結果である。横山らの提案する経路計画方法では、円形走査検索法を採用しているために三次元環境へは適用できない。SPM法では、ベクトル場の理論を導入したことで多次元環境への適用が可能になっている。

4. 移動ロボットシステム

実環境下でのSPM法の有効性を確認するために、図7のような移動ロボットシステムを開発した。

本システムは、リモートブレインシステムであり、その構成は以下のとおりである。移動ロボットの作業環境は、

図7 障害物回避のための移動ロボットシステム
Fig. 7. A mobile robot system for obstacle avoidance.

常時、作業環境の上部に設置されたCCDカメラによる鳥観画像を基に監視される。PCは鳥観画像に画像処理を施し、障害物、移動ロボットを抽出、それぞれの位置情報をEWSへ転送する。

EWSでは、PCから送られてくる位置情報を基に仮想環境を形成し、SPM法によりロボットの進路決定を行う。ロボットの進路は、前後進および左右回転からなる動作パターンに変換後、送信機を介して赤外光通信にて移動ロボットへ送られる。動作パターン送信コードにはロボッ

図8 実験の経過
Fig. 8. The passage of experiment.

ト識別コードが付加されており、同種のロボットが複数、作業環境上にある場合でも混信することはない。

移動ロボットは、ステッピングモータ2個からなる駆動系によって前後進および左右回転が可能である。

5. 移動ロボットシステムによる実験結果

3台の移動ロボット①, ②, ③を用いて動的環境を構成し、障害物およびロボット間の衝突回避実験を行った。各ロボットはそれぞれ本システムにより他の2台のロボットを障害物として抽出し、仮想環境を構成、SPM法により進路を決定し、移動するものとした。SPM法における諸パラメータは、ロボットの初期位置および移動目標を除き3台とも同じにした。本実験で用いた作業環境にはロボット以外に二つの静的障害物が存在し、ロボットが移動目標へ到達するためには、すべてのロボットが作業環境の中央(中央通路と呼ぶ)を通らなければならない状況を設定した。実験結果として図8に本実験の経過を、図9に各ロボットの軌跡をそれぞれ示す。ロボット②は3台のロボットのなかで最も効果的に移動目標へ達している。ロボット③はロボット②の中央通路進入に伴いいったん中央通路から離れた後、ロボット②の通過を待って中央通路へ進入している。ロボット①はロボット②に中央通路を遮られて中央通路から遠ざかった結果、ロボット③よりも中央通路への進入が遅れ、中央通路を最後に通過している。本実験では、3台のロボット間に優先順位を付けていない。従って各ロボットの動作に違いが生じたのは、計算機シミュレーションで示したような、ロボットを仮想環境上で先導する局所感覚点群の中央通路接近時における形成段階(局所感覚点群を構成する感覚点数)の違いによるものである。この形成段階の違いは、ロボットの初期位置と感覚点の初期

配置に起因している。

本実験ではロボット間の協調行動について考慮していないが、本実験結果を協調行動の観点から考察すると、ロボット間で感覚点情報を共有することによって、SPM法は協調行動へ応用できる可能性がある。

6. むすび

ポテンシャル法は、計画のリアルタイム性に問題はあるものの作業環境やロボットの諸特性に対して柔軟性があり、未知で複雑な環境内を移動する自律型ロボットの経路計画には有効な手法である。横山らは、感覚点移動法と円形走査検索法からなるポテンシャル法に基づく経路計画方法を提案し、リアルタイムにポテンシャル場が生成できることを示したが、環境に対する適用範囲が制限されているほか、経路計画方法としてのリアルタイム性および多次元環境への適用に関して問題があった。

本論文は、この経路計画方法における問題点を明らかにし、感覚点移動法において仮想センサの機能を新たに定義するとともにベクトル場の理論を導入し、新たな経路計画方法としてSPM法を提案した。SPM法による経路計画が、感覚点移動法、円形走査検索法による経路計画での問題点を解消していることを計算機シミュレーションによって示した。

鳥観画像を利用する移動ロボットシステムを開発し、SPM法の実環境での有効性を確認するとともに、3台の移動ロボット間の衝突回避に本手法を適用して、動的環境に対する有効性を確認した。

終りに、本研究について御討論いただいた工学院大学横山修一教授、電気通信大学山藤和男教授に感謝いたします。本研究の一部は大川情報財団の援助による。

(平成6年9月20日受付, 同6年12月21日再受付)

文 献

- (1) S. Udupa: "Collision detection and avoidance in computer controlled manipulator", Proc. 5th IJCAI, p. 737 (1977)
- (2) Lozano-Perez: "Automatic planning of manipulator transfer movements", IEEE Trans. Syst. Man. & Cybern., SMC-11, No. 10, 681 (1981)
- (3) T. Lozano-Perez & M. A. Wesley: "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles", Commun. ACM, 22, p. 560 (1979)
- (4) Kim, Khosla: "Real-time obstacle avoidance using harmonic potential functions", Proc. of 1991 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, p. 790 (1991)
- (5) 佐藤: 「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」, ロボット学誌, 11, No. 5, 702 (平5)
- (6) 劉・有本: 「局所センサ情報を用いた未知環境における複数の移動ロボットの運動計画法」, 同上, 10, No. 2, 78 (平4)
- (7) 横山・内田・福島・柿沼: 「障害物回避問題におけるポテンシャル場の自律生成」, 同上, 10, No. 4, 510 (平4)
- (8) S. Yokoyama, K. Fukushima & M. Uchida: "Study of avoiding obstacles by neural networks", 1992 IEEE Int. Conf. Intelligent Control and Instrumentation, p. 412
- (9) 内田・井出: 「自律型ロボットのためのSPM法による経路計画」, 電学論C, 114, 964 (平6-9)

図9 実験結果(移動ロボットの軌跡)

Fig. 9. A result of experiment (trajectory of mobile robot).

内 田 雅 文

(正員) 1964 年 9 月 6 日生。1990 年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了(電気工学専攻)。移動ロボット, ニューラルネットワークなどの研究に従事。現在, 青山学院大学理工学部電気電子工学科助手。IEEE, 日本ロボット学会, 神経回路学会会員。

井 出 英 人

(正員) 1970 年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了(電気工学専攻)。1985 年 UCLA 応用科学科客員研究員。1986 年同脳研究所客員教授。感覚の計測, 感覚代行の研究に従事。青山学院大学理工学部講師, 助教授を経て, 現在, 同教授。工学博士。日本ロボット学会, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会会員。