複数台の移動ロボットによる未知環境探索

非会員 阿部 一博 (東京電機大学)

正員 柿倉 正義 (東京電機大学)

A Path Planning Method of Mobile Robots for Unknown Environment Exploration

Kazuhiro Abe, Non-member, Masayoshi Kakikura, Member (Tokyo Denki University)

It is predicted that the demands of robots in home increase in the future. The behavior of the robots must be changed by the structure of houses or the arrangement of furnitures there. Therefore, the robots will face with the unknown environments necessarily. In these situation, the cooperation tasks by plural robots is necessary when we consider the various kind of works and its efficiencies. In this paper, we consider about a cooperation task of robots in unknown environment. We take the problem of unknown environment exploration by mobile robots as an example here. The aim of this problem lets mobile robots explore unknown environment and make the map. There are two important points, the efficiency of work and independence on environment, to raise here. We propose algorithm for path planning and collision avoidance between mobile robots in order to form an action pattern to meet these conditions. In case for forming an action pattern using these algorithms, we use Genetic Programming (GP). Finally, we let mobile robots explore 5 unknown environments in the simulation with an action pattern established in this way.

キーワード：未知環境, 協調作業, 作業効率の向上, 頑健性

1. 序 論

従来のロボット研究においては多機能で高度に智能化した単体のロボットの開発に力がおかれてきたが、環境へ適応する能力の限界や作業を実行する際の空間的、時間的な制約等技術的限界が明らかになり、複数台ロボットの協調での多機能化の必要性が叫ばれるようになった⁽¹⁾。他方同時にこれを実現する際の問題も挙げられており、その最も大きなものとして、ロボット相互の干渉がある。自律型ロボット作成の際は、与えられた環境で発生し得る可能性がある状況を予測し各ロボットがそれらの状況に対しそれなりに対処できるようしておかなければならない。このとき静的な環境であれば考え得る状況数はおよそ限られたものとなる。しかしこれが動的な環境、すなわちロボットの自己意思とは無関係に動作する対象が存在する場合、考慮に入れなければならない状況数は組み合わせ論的に増加してしまうこととなる。

また、複数台ロボットによる協調作業を既知環境で行わせる研究は多く見られるが未知環境を対象にしたものは少ない⁽²⁾。しかし未知環境で作業を行うようなロボットの必要性は今後ますます増大するように思われる。本研究は前述の背景の下、「未知環境での複数台ロボットによる協調作業」の考察をするものである。

本研究での重要な課題として次の2つが挙げられる。

- (1) どのような未知環境が与えられても作業の遂行を保証するという頑健性を有する
- (2) 作業の効率性を向上させ得る

上記の問題を解決するため、本研究ではその一手法としてGP(遺伝的プログラミング)を用いる。この手法は頑健性および効率性に優れたロボットの動作パタンの生成に対し有効であると考えられ、シミュレーション上にて障害物回避を行う動作パターンをこの手法を用いて生成した例も多く報告されている⁽³⁾。さらにこの手法のような経験に基づく頑健性の獲得は、経験を通して知識の一般化を行い課題状況の変化に柔軟に対応することができる人の熟達者に見られる特徴の1つであり、知的システムという観点からも注目すべきところがある⁽⁴⁾。

前述の考察に基づき、本研究では協調作業の例として複数台の移動ロボットによる未知環境探索の問題を取り上げ、この問題を解く上で必要な手法(経路探索法および移動ロボット同士の衝突回避法)の提案、および環境変動に対する頑健性および効率性の高い各移動ロボットの動作パターンをGPを用いて生成することを目的とする。

2. 理 論 ⁽⁵⁾

〈2・1〉 未知環境探索問題の解法 本研究では複数台の移動ロボットに未知環境を探索させ、その環境マップを作成するシステムを構築することを主な目的としている。この目的を達成するために必要と思われる作業としては、環境認識および行動計画の2つがあり、ここでは前者により獲得、蓄積された障害物に関する情報の存在を仮定し、これらの情報を用い、移動ロボットの動作を決定する後者に関する研究を行う。なお本研究における未知環境とは、平面上に幾つかの静的な障害物があるような環境を想定している。この未知環境上において互いの動作に干渉しない複数台の移動ロボットが同時に探索をおこなうため、環境全体としては動的なものとなる。さらに環境マップとは、障害物に関する情報を統合して、未知環境内部を可視化したものである。

本研究を行うに際し、はじめに問題となるのは、未知環境探索問題を如何にとらえるかということである。ここでは探索範囲全体に対しあらかじめ図1に示すような経路を仮定し⁽⁶⁾、移動ロボットを経路に沿って移動させ、丸印で示す観測点上で隣接する観測点を包含する領域内の認識を行わせるような作業を想定している。これにより、この問題を「複数台の移動ロボットに全観測可能点(観測可能な全ての観測点)を通過させる」という問題で表現することができる。またさらに無秩序に探索をさせた際に生じる探索洩れや、与えられた範囲全てを探索し終えたか否かの判断の難しさからも同時に解放されることが期待できる。

このような問題において、

- (1) 移動ロボットの情報の処理をなるべく単純化するために、周囲の情報のみで行動を決定できる
 - (2) どのような未知環境が与えられても環境の認識を保証するという頑健性を有する
 - (3) 探索の効率性を向上させ得る
- を満足するシステムの作成を試みる。

ここで、移動ロボットに要求される最低限の能力として

図2 移動ロボットの概念図
Fig. 2. Concept of mobile robot

は、図2に示すような、経路グラフ上の経路および観測点を通過することができる能力、経路上の障害物を認識することができる能力2つを同時に満足するものを仮定する。

〈2・2〉 経路探索法 経路探索によく用いられる手法の1つにポテンシャル法が存在する⁽⁷⁾⁽⁸⁾。この手法は例えば、障害物に接触することなく現在地から目的地までの経路探索する場合、障害物からの斥力と目的地の引力をスカラーのポテンシャルで表現し、谷を縫うことにより解決する。

本手法の利点は、移動ロボット自体は目的地を目指して行動する訳でなく、現在位置のポテンシャルと周囲のポテンシャルを比較し、低い方へ移動することで問題を解決することができるという点である。すなわち本手法を応用すれば、「隣接する観測点中、観測領域に含まれた回数の少ない観測点の方向に移動する」との原理⁽⁶⁾に基づく手法を用いた経路探索では難しいと思われる、周囲の情報のみを利用しての探索を可能にすることに期待をもつことができる。本研究では、図3に示すように観測点各々に対してポテンシャルを設定できるようにして、未通過の観測可能点のそ

図1 経路グラフ
Fig. 1. Path graph

観測点の数値はポテンシャルの高さを示す

図3 経路探索でのポテンシャル
Fig. 3. Potential for path planning

図4 仮想障害物
Fig. 4. Virtual obstacle

の値が吸引力となるように適切にその分布を変化させることを試みる。ここでのポテンシャルとは移動ロボットが自ら、現在位置する観測点に対し数値的の重みをおくことであり、その重みは前の重みを1増加させただけという単純なものである。

〈2・3〉 移動ロボット同士の衝突回避法 各移動ロボットが周囲の情報のみを頼りに他の移動ロボットとの衝突回避ができるようにするため、本研究では図4に示すように回避行動をとる移動ロボットが進行方向に隣接し存在する観測点に仮想障害物を設置できるようにする。ここでの仮想障害物とは、設置した移動ロボットにとっては何も存在しないのと同義だが他の移動ロボットにとっては真の障害物として認識されるというものである。すなわち例えば移動ロボットが障害物を認識したときに、それらを回避することを学習し、同時に仮想障害物を移動ロボットが移動する前に、あらかじめ適切に設置することを学習すれば、移動ロボット同士の衝突回避を可能にすることに期待をもつことができる。

〈2・4〉 GPの概説 本研究では移動ロボットの行動パタンの生成にGPを用いることを試みる。これは進化論的アプローチにより目的プログラムを獲得するものであり基本的な手法はGenetic Algorithmと同一であり異なる点は遺伝子表現にストリングではなく木構造を用いることとオペレーターを拡張するという2点である。

上述の手法を用いる際に必要な設定は、木構造の各ノードに用いられる記号群や、適合度算出用の評価関数である。各ノードは木構造で表現されているプログラムの機能をそれぞれ表現しており、関数ノードは行動計画を表し終端ノードは対象での行動実行を表すものである。

なお本研究では木構造を表現する手法としてLISPのS式表現を用いている。

〈2・5〉 記号群設定 次に本研究で用いる各ノードの記号群を表1、2に示す。

〈2・6〉 適合度算出 GPでは目的に応じた適合度算出用の評価関数が不可欠であり、本研究では複数台の移動ロボットの協同作業による未知環境の完全認識を前提としたその効率の向上を目的としているため、これがよく反映さ

表1 関数ノードに用いる記号群
Table 1. Sign group used for function node

記号	機能
(Difference A B)	隣接する進行方向の観測点のポテンシャルより現在位置のポテンシャルの方が高い場合にはAを実行して、低い場合にはBを実行する。
(Run2 A B)	Aを実行した後にBを実行する。
(Search A B)	隣接する進行方向の経路上もしくは、観測点上に真の障害物がある場合にはAを実行して、ない場合にはBを実行する。

表2 終端ノードに用いる記号群
Table 2. Sign group used for terminal node

記号	機能
Right	移動ロボットの進行方向を60度右に回転させる。
Left	移動ロボットの進行方向を60度左に回転させる。
Move	隣接する進行方向の観測点に移動する。
Mount	現在位置のポテンシャルを1増加する。
Place	隣接する進行方向の観測点に仮想障害物を設置する。
Take	現在位置にある仮想障害物を除去する。

れ得るような、次に示す評価関数で適合度算出を行う。

$$\text{適合度} = \{ \text{認識率} \times w1 + \text{効率} \times w2 \} \times 100[\%] \quad (1)$$

$$\text{認識率} = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{対象とする全ての未知環境内} \\ \text{に存在する全観測可能点中、} \\ \text{実際に移動ロボットが通過し} \\ \text{た観測点の総数} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} \text{対象とする全ての未知環境内} \\ \text{に存在する全観測可能点の総} \\ \text{数} \end{array} \right)} \quad (2)$$

$$\text{効率} = 1 - \frac{\left(\begin{array}{l} \text{移動ロボットが対象とする全} \\ \text{ての未知環境内を探索するの} \\ \text{に必要なステップ数の合} \\ \text{計値} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} \text{移動ロボットが対象とする全} \\ \text{ての未知環境内を探索するの} \\ \text{に必要なステップ数の最} \\ \text{大値} \end{array} \right)} \quad (3)$$

ここでステップ数とは、終端ノードの実行毎に1ずつ増加するものであり、また、移動ロボットが対象とする全ての未知環境内を探索するのに必要とするステップ数の最大値は次のような式によって与えられる。ただしこの式で用いられているMaxStepとは、各移動ロボットが対象とする全ての未知環境内を探索するのに必要とするステップ数

の最大値の予測値を示す。

最大値 = $MaxStep \times (\text{移動ロボットの台数}) \quad (4)$

式(1)では移動ロボットの群が与えられた未知環境のセットの内の1つでも完全に認識できないうちは、認識率のみが適合度に作用し、幾つかが完全に認識され始めると効率も適合度に作用するようになっていく。しかし認識率および効率に対しそれぞれ $w1$ と $w2(w1 > w2)$ の重み付けがしてあるため、対象としている未知環境のセットの内の全てが完全に認識されるまで、効率はほとんど適合度に影響しない仕組みになっている。またさらに本研究では学習スピードの向上を目的として、他の移動ロボットが設置した仮想障害物に衝突した際に、移動ロボットが対象とする全ての未知環境を探索するのに必要としたステップ数をペナルティーとしてある定数 $StepUp$ だけ引き上げるように処理を施している。

3. シミュレーション方法および結果

〈3・1〉 シミュレーション方法 次本研究におけるシミュレーション方法の流れを記述する。

- (1) ランダムに初期世代の集団の生成および、比較用の未知環境パターン(全5パターン)の作成を行う
- (2) 世代毎に異なる未知環境パターン(全5パターン)を作成し、個体(これは移動ロボットの行動パターンに対応してる)にその未知環境パターンを探索させ適合度算出を行う
- (3) (2)で算出された適合度のうち最高の適合度を有する優秀な個体を1つ選出し、先に作成した比較用の未知環境パターンを探索させ適合度算出を行う
- (4) 個体各々の適合度に従い、確率的にオペレータを作用させて集団を変更する
- (5) 世代数100に達するまで(2)へ

また本研究では複数台の移動ロボットを用いる際は、ポテンシャル、仮想障害物に関する情報および未知環境パターンを共有する仕組みになっている。

〈3・2〉 シミュレーション環境 次本研究におけるシミュレーションをおこなう際の環境を表3に示す。また諸変数の設定は以下になっており、これらはすべて経験に基づく実験値である。

$w1 = 0.6$
 $w2 = 0.4$
 $MaxStep = 30000$
 $StepUp = 10000$

〈3・3〉 シミュレーション結果 本研究では1台、3台、5台の移動ロボットを用いた場合のシミュレーションをそれぞれ行い、その結果獲得された最良個体(比較用の未知環境パターンを探索させた適合度のうちで、最高の適合度を有する個体に対応する)に別に作成した5つの未知環境パターンを探索させた際に必要としたステップ数を表4に示した。

表3 実験環境

Table 3. Environment of examination

使用機種	SS-20
OS	Solaris2.5
プログラミング言語	SunOS4.1.3のcコンパイラ
計算時間	72時間
集団数	1000
関数ノードの交叉確率	0.2
関数と終端ノードの交叉確率	0.4
コピーのみの確率	0.1
生成規則	ランダムにノードが終端か否か決定
ライブラリ	参考文献(3)に付属のCD-ROM内に存在するsgpcl.1

表4 1台、3台、5台の移動ロボットによる未知環境探索

Table 4. Unknown environment exploration by 1, 3 or 5 mobile robot(s)

マップ番号	ロボット1
1	6453
2	6820
3	4887
4	6980
5	5840

マップ番号	ロボット1	ロボット2	ロボット3
1	5352	5373	5364
2	3477	3263	3229
3	3514	3415	3329
4	3433	3296	3331
5	3510	3567	3641

マップ番号	ロボット1	ロボット2	ロボット3	ロボット4	ロボット5
1	2604	2604	2604	2604	2603
2	1976	1976	1976	1975	1975
3	2108	2108	2108	2108	2107
4	2098	2098	2097	2097	2097
5	1476	1475	1475	1475	1475

図5 必要としたステップ数の最大値
Fig. 5. Max Number of needed step

なおこの3つの表中の太枠線で囲まれている部分は、表中のマップ番号で示す未知環境パターンを探索させた際に必要

図6 未知環境探索例(経路上の塗りつぶされた正方形は障害物を表し、丸は観測点を表す。)

Fig. 6. Example of unknown environment exploration

としたステップ数の最大値を示しており、移動ロボットの台数の変化と必要としたステップ数の最大値との関係を図5に示した。

4. 結論および今後の課題

表4より各移動ロボットが必要としたステップ数がMaxStepを上回っていないこと、および1台の移動ロボットによる未知環境探索で必要としたステップ数より3台、5台による方が少ないことを伺い知ることができる。これらより、

- (1) 移動ロボットの情報の処理をなるべく単純化するために、周囲の情報のみで行動を決定できる
- (2) どのような未知環境が与えられても環境の認識を保証するという頑健性を有する
- (3) 探索の効率性を向上させ得る

を満足するシステムの作成ができたことと結論付けることができ、同時に本研究の手法(経路探索法および移動ロボット同士の衝突回避法)が、複数台の移動ロボットの未知環境での協調行動の生成に対し有効であることも結論付けることができる。しかし他方3台、5台用いた場合の1台の移動ロボットによる未知環境探索で必要としたステップ数に対する比例的な減少が見られないものも図5より観測される。この現象は先の文献(6)の手法を用いた経路探索にも見られるもので、この原因として、移動ロボットが図6に示す通り障害物の密度の薄い領域から濃い領域に移動する際、進行方向に障害物を認識し、それを回避した方向が密度の薄い領域である場合は、密度の薄い方向に移動し、元の密度の濃い領域に戻るまで無駄な動きをしてしまうことが考えられ、先の手法ではこの回避に未観測と思われる観測点に移動することを試みているが、本研究では周囲の情報のみで行動を決定できることを目的の1つとしているために、他

のアルゴリズムを用いこの問題を解決する必要があり、このことが今後の課題として残される。

最後に本研究に協力された神取 大輔氏に謝意を表す。

(平成10年5月6日受付, 同10年12月25日再受付)

文 献

- (1) 油田 信一:「複数の自律移動ロボットの協調行動」, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4, pp.433-438, 1992
- (2) 菅野 重樹:「ロボット教育・研究の現状」, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.3, pp.322-325, 1996
- (3) 伊庭 育志:「遺伝的プログラミング」, 東京電機大学出版局, 1996
- (4) 大野 宏司・古橋 武・内川 嘉樹:「遺伝的アルゴリズムによる仮想的な移動ロボットの環境変化に対応する一般化知識の獲得手法」, 電気学会論文誌C, Vol.118, No.2, pp.136-141, 1998
- (5) 阿部 一博・神取 大輔・柿倉 正義:「複数台の移動ロボットによる未知環境探索」, 電気学会研究会資料 システム・制御研究会, SC-98-25, pp.33-38, 1998
- (6) Toshiyuki Kumaki, Masahito Nakajima and Masayoshi Kakikura: "Environment Recognition and Path Planning by Multiple Mobile Robots", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.9, No.5, pp.380-386, 1997
- (7) Jurgen Guldner, Vadim I. Utkin and Rudolf Bauer: "A three-layered hierarchical path control system for mobile robots: Algorithms and experiments", Robotics and Autonomous System, Vol.14, pp.133-147, 1995
- (8) 北村 喜文・田中 貴秋・岸野 文郎・谷内田正彦:「octreeとポテンシャル場を用いた三次元環境での経路探索」, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.8, pp.1186-1193, 1996

付 録

1台の移動ロボットによる未知環境探索のために移動ロボットに与えられる行動パターンを次に記す。

```
( Run2      Right      (Difference
( Run2      (Search
(Difference Right      (Search
(Search      ( Run2
( Run2      (Search
( Run2      Left Place)      Move )
( Run2      Move      (Difference
...
(Search      (Search Place
(Search      ( Run2 Right Move )
              Right)) (Difference
(Search      (Difference Place
(Difference Move Mount))      Move )
              Take )))      Right)))
              Mount)))      Mount))
```

但し移動ロボットが1台のみの場合、

```
(Difference      (Difference Move Left )
Left )
```

は、

```
(Difference Move Left )
```

と簡明化して表現することが出来るため、次に先の遺伝子を簡明化したものを示す。

```
( Run2      Right      (Difference
( Run2      (Search      Right Move )
(Difference      (Search      Take
```

(Run2 Move Left)) Mount))

3台の移動ロボットによる未知環境探索のために各々の移動ロボットに与えられる行動ボタンを次に記す。

(Run2 (Run2 Left
(Difference (Difference
(Search (Difference Place Take)
Move) (Search Place Move))
Place)) (Difference
(Difference (Difference
(Search Place Move) (Difference
(Run2 (Difference
(Search Place (Difference Place Right))
(Run2 (Difference
(Search Move Mount) (Search
(Run2 Left (Difference
(Run2 Left (Difference
(Search Place Left) Place))
Place)) (Search Move Move))
Place)) (Run2 Mount Mount))
(Difference Mount Left) (Difference Move
(Search (Difference
(Difference (Difference
(Run2 Take (Run2
(Run2 Left (Difference
(Search (Difference
(Difference Take Place) (Difference
(Run2 Right (Difference
(Difference Mount Mount) Mount))
(Search (Search Left
(Difference (Search Move Place)
Take)) Move))
Move) Mount))
(Run2 (Run2 Left
(Difference (Difference
(Search Place Move) (Search
(Difference Place (Run2 Left
(Search Place Mount))) (Search
(Difference Right Right) Take))
Mount)) Place))
(Difference (Run2
(Difference (Run2
(Search Mount Move) Mount)
(Run2 Take Mount)) (Run2
(Run2 Place (Search Move
(Search Mount Mount)) (Run2 Mount Mount))
(Search Place Move)) Mount))
Move)) Left)
Mount))

5台の移動ロボットによる未知環境探索のために各々の移動ロボットに与えられる行動ボタンを次に記す。

(Difference (Run2 Place
(Difference (Search Right Move)
(Difference (Search Move Move)
Move))) (Difference
(Search (Difference
(Difference (Difference Mount
(Difference (Search Move
(Difference (Difference
(Difference Right Place) (Search
(Search Place Place) (Run2
(Search Left Take) Right)))
(Difference Left Mount)) Move))

(Difference (Search Right
(Run2 Right Mount)) (Difference
(Search (Difference Place Mount)
(Run2 Place Take)) (Difference
(Search Right Move) (Difference
(Search (Difference
(Difference Mount (Difference
(Difference (Run2 Move
(Run2 Mount Mount)) (Run2 Right
(Run2 Move Right))) (Run2 Take Take)))
(Search (Difference Take Move)
Mount)) Left)
(Run2 Move (Run2 Mount
(Run2 Right Mount))))))
(Difference (Search Move
(Difference (Search
(Search Mount Move) Move)
(Run2 Left (Difference
(Run2 (Difference
(Difference (Run2 Right Mount)
(Search Move Place)) (Run2 Move Mount))
(Difference (Run2 Move
(Run2 (Run2 Left Left)
Move)) (Difference Move Mount)))
Mount))) Right))
(Search (Difference
(Run2 Right Move)) (Difference Right
(Search (Difference
(Difference Place (Run2 Right Mount))
Take) (Difference
(Run2 Move (Run2 Mount Mount))
(Difference Right (Difference
(Run2 Move (Run2 Mount Mount))
(Difference (Run2
(Search (Difference
Left) (Search Move Move)
(Difference (Search Left Take)
Left)) (Run2 Mount Left))
Take)))) (Run2 Right Mount)))
(Run2 Right Mount)))

阿部 一博 (非会員) 1973年7月26日生 1998年3月東京電機大学大学院工学研究科電子工学専攻修了。

柿倉正義 (正員) 1942年9月4日生 1965年東京電機大工電子卒。同年、電気試験所(現電子技術総合研究所)入所。1980年情報制御研究室長、1988年自律システム研究室長。1974-1975年エジンバラ大学人工知能学科。1990年東京電機大工学部電子工学科教授。工学博士(東京工業大学)