

# 行動切換器を用いた自律移動ロボットのナビゲーション

## Mobile Robot Navigation Based on a Behavior Selector

○ 釜谷博行\*、阿部健一\*\*

\* 八戸工業高等専門学校

\*\* 東北大学工学部

○ Hiroyuki Kamaya\*, Kenichi Abe\*\*

\* Hachinohe National College of Technology

\*\* Faculty of Engineering, Tohoku University

キーワード：自律移動ロボット(Autonomous Mobile Robot), デッドロック(Deadlock),  
行動切換器(Behavior Selector), 最短経路(Shortest Path),  
未知環境(2-D Uncertain World)

連絡先：〒039-11 青森県八戸市田面木字上野平 16-1

八戸工業高等専門学校 電気工学科

釜谷博行

Email: kamaya-e@hachinohe-ct.ac.jp

TEL 0178(27)7283

FAX 0178(27)9379

### 1. はじめに

スタート地点からゴール地点まで障害物を回避しつつ移動ロボットを安全に誘導するため、さまざまなロボットナビゲーションアルゴリズムが提案されている。

障害物の位置や形状に関する情報があらかじめ与えられている既知環境では、ゴールへ至るまでの最適経路をオフラインにより理論的に計算することができる<sup>[1]</sup>。この代表的なアルゴリズムとしてA\*アルゴリズムなどが知られている。これに対して、障害物情報が前もって全く与えられていない未知環境では、ロボットは不確実性の大きなセンサ情報に基づいて行動を決定しなければならないため、ゴールへの到達可能性を保証しつつ、最適経

路を見いだすことは、非常に難しい問題となる。

本稿では、まず、未知環境中においてロボットをゴール地点まで誘導する場合のさまざまな手法の問題点について考察する。つぎに、それらの結果を踏まえて、環境情報のための記憶容量と行動計画に関する計算量を抑えつつ、デッドロックフリー性能を有するロボットナビゲータを提案する。さらに、センサノイズや移動時の誤差などロボット実装時の問題点について考察する。最後に、最短経路探索問題において、探索を効率的に行う方法について検討する。

以下の議論では、ゴール座標、ロボット座標は既知であるとする。なお、ロボットの座

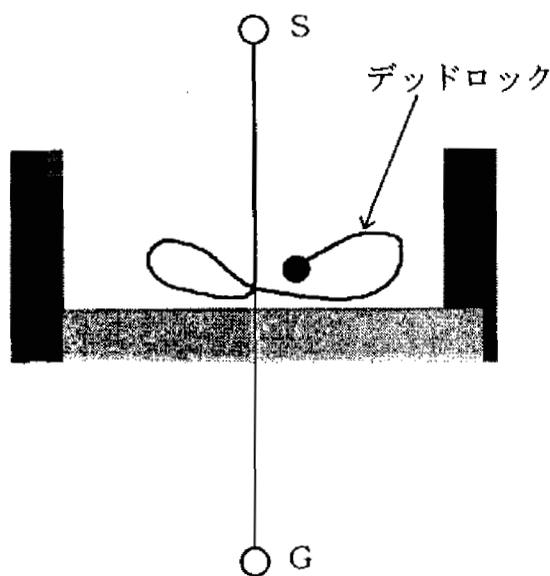


図1 デッドロック

標は、車輪直結のロータリーエンコーダにより、任意のサンプリングで車輪の回転角度を計測することで計算できる。

## 2. 従来の手法

未知環境においてロボットを安全に誘導するため、局所的なセンサ情報に頼る場合には、図1に示すようにデッドロック状態に陥る。例えば、ポテンシャル法では、障害物からの反発力  $F_r$  とゴールへロボットを誘導するための向心力  $F_g$  の合力  $F_a$  によってロボットの進行方向を決定する<sup>[2]</sup>。図2ではゴールは左側に見えるためロボットは左側に進路をとる。しかし、ゴールの方向が左から右へ切り換わる時点でロボットの進行方向が反転し、デッドロック状態に陥る。

Brooks によって提案されたサブサンプリングアーキテクチャ<sup>[3]</sup>を用いた場合、ナビゲーションシステムは「障害物回避行動」と「ゴール探索行動」の2つの行動モジュールから構成される(図3)。障害物回避行動の優先順位が高いため、障害物の近くではゴール探索行動が抑制される。障害物から離れると再度ゴール探索行動が再開される。このため、2つの行動が交互に実行されロボットはデッ

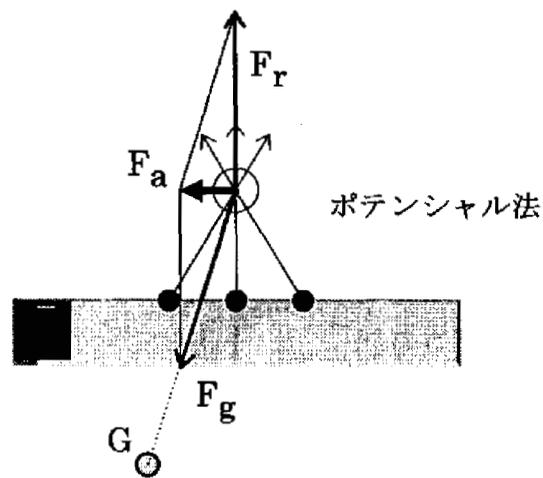


図2 ポテンシャル法

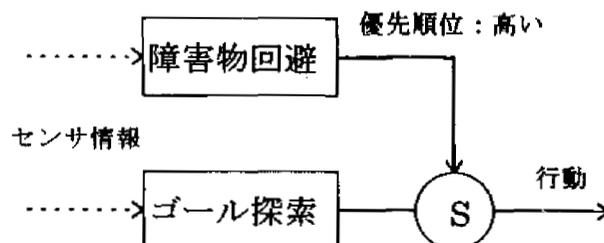


図3 サブサンプリングアーキテクチャ

ドロック状態に陥る。

デッドロックを回避するために、グローバルマップを構築する方法が提案されている<sup>[4]</sup>。しかし、センサ誤差や移動誤差といった環境中に存在するさまざまなノイズの影響によって、整合性を保持することが非常に難しい。

近年、センサ情報から状態を決め、その状態において最適な行動を報酬に基づいて学習する学習型ロボットに関する研究が盛んである<sup>[5]</sup>。ロボットナビゲーション問題では、ゴールに到達した場合に報酬を与え、障害物と衝突した場合に罰則を与えることで、学習器を構成できる。しかし、この場合、学習にかなり時間がかかる、多くの記憶容量を必要とする、計算量が非常に大きいなどの問題がある。

## 3. 提案するロボットナビゲータ

ロボットが障害物によって進行を遮られた場合、その障害物の裏側に回り込めばゴールへ到達することができる。ロボットを障害物の裏側へ誘導するため、ロボットを障害物に

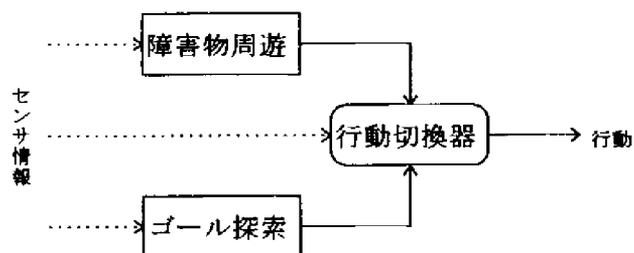


図4 提案するロボットナビゲータ

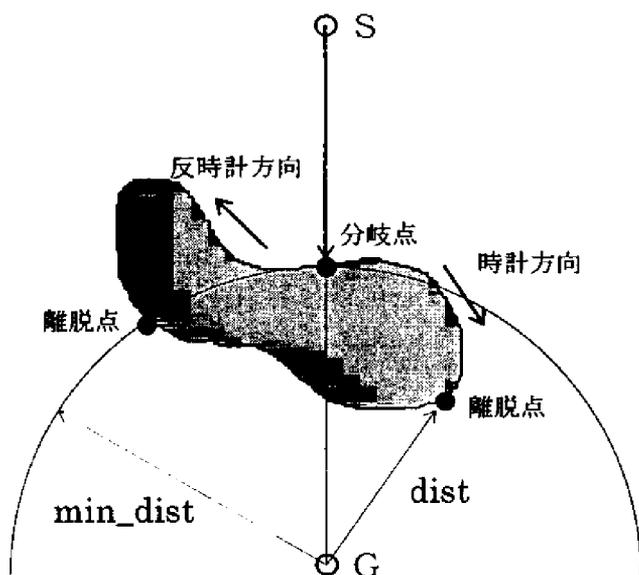


図5 分岐点と離脱点

沿って進行させなければならない。

したがって、ロボットナビゲータは、図4に示すように「障害物周遊」と「ゴール探索」の2つの行動モジュールから構成される。障害物がロボットの周囲に存在しない場合には「ゴール探索」によって、ゴール方向へ誘導する。障害物が検出されると、「障害物周遊」によって、ロボットはその障害物の周囲を沿うように誘導される。2つの行動モジュールの調停は、センサ情報に基づいて「行動切換器」[6][7]によって行われる。2つの行動を切り換えるアルゴリズムは、つぎのとおりである(図5)。

ロボットが障害物に遭遇する(この場所を分岐点とする)と、障害物を反時計方向に回るか、あるいは時計方向に回るかの移動方向を選択する。このとき、分岐点におけるゴールまでの直線距離  $min\_dist$  を保存する。ロボ

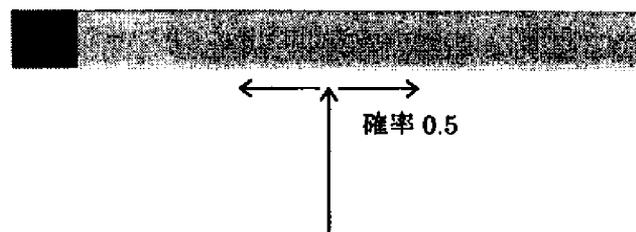
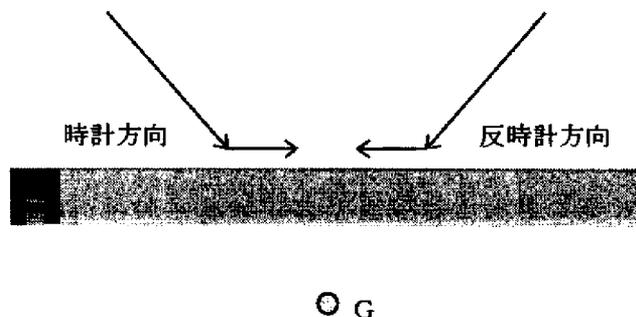


図6 移動方向の選択

ットが障害物から離れてゴール方向へ移動を開始する点を離脱点とする。この離脱点は以下の2つの条件が満足されたときに決定される。

- (1) ゴール方向に障害物が無い
- (2) 現在のロボット座標からゴールまでの距離  $dist$  を計算し、 $dist < min\_dist$  を満たす。

これらの条件にしたがうと、分岐点および離脱点は漸近的にゴールへ接近するため、ロボットのゴール到達性が保証される[8]。

シミュレーションでは、障害物情報を取得するセンサは8方向に取り付けられ、検出距離は5段階とする。また、ロボットの移動方向は8方向とし、障害物との距離に応じて速度調整を行う。つまり、障害物に接近するほど減速し、障害物が存在しない場合には高速でゴールに向かう。

移動方向の選択は、ロボットの方向転換量の小さい方向を選択する。ロボット前面のみに障害物が存在する場合には、確率0.5で反時計方向か時計方向かを選択する(図6)。

#### 4. センサノイズへの対応

センサノイズがあると実際に障害物の存在

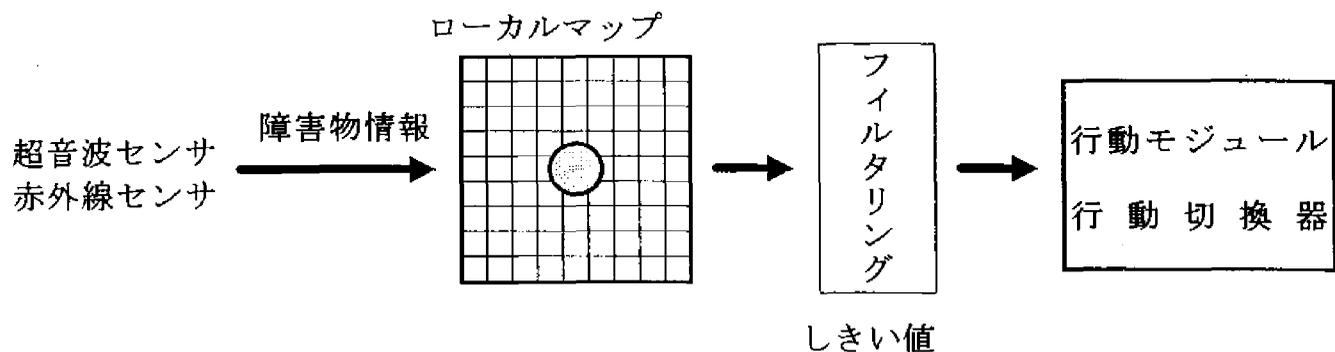


図7 ローカルマップとフィルタリングによるセンサノイズの除去

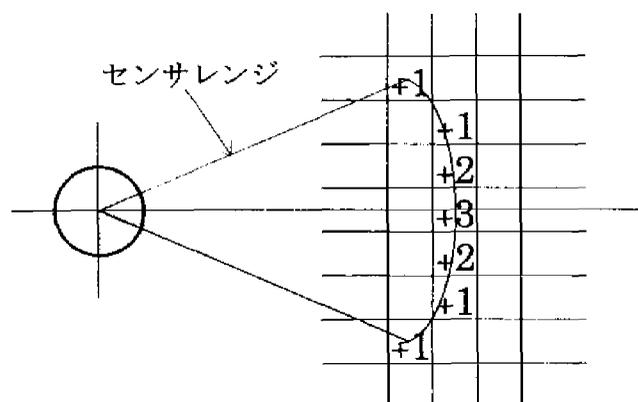


図8 ローカルマップへの障害物情報の記録

しない地点でも、頻繁に行動切り換えを行うためロボットの行動が不安定となる。そこで、ロボット周囲の障害物情報を短期的にローカルマップへ記憶し、ローカルマップ上でしきい値処理を行い、あるしきい値以上のデータのみを行動モジュールおよび行動切換器で利用する(図7)。

超音波測距センサは広い指向性をもっており、センサの真正面方向の障害物を検出する確率が高い。このため、ローカルマップへの障害物情報の記録は図8に示すように、対応するセル値をインクリメントすることによって行われる。また、障害物がないと認識された場合には、対応するローカルマップ上のセル値をデクリメントする。なお、ロボットの移動とともに、ローカルマップは更新され、範囲を外れた障害物情報はクリアされる。

## 5. シミュレーション結果

センサノイズのない場合のシミュレーション結果を図9に示す。この場合、うまくデッドロックを回避しゴールへ到達している。しかし、移動経路は長い。

2%の確率でセンシングエラーをランダムに与えた場合、ローカルマップを利用しないと図10に示すように障害物が存在しないところでも行動切り換えが生じ行動が不安定となった。図11は、図10に示す環境中のゴール近くの障害物において、サークルで囲んだ範囲のセンサ情報である。障害物の存在しない場所も障害物があるというような誤った認識がされている。最悪の場合は、障害物から永久に離脱できなくなりデッドロックに陥ってしまう。これに対して、ローカルマップを利用するとうまくゴールへ到達できる(図12)。

車輪のすべり等によって生じる移動誤差に対するロバスト性をシミュレーションにより実験的に検討する。この場合、2%の確率で車輪滑りをランダムに与えた。シミュレーション結果を図13に示す。ここでは、ロボットの実際の軌跡と計算上の軌跡を合わせて表示している。結果として、提案したナビゲータはゴールまでの直線距離のみを利用しているため、移動誤差に対してある程度のロバスト性を有することがわかった。

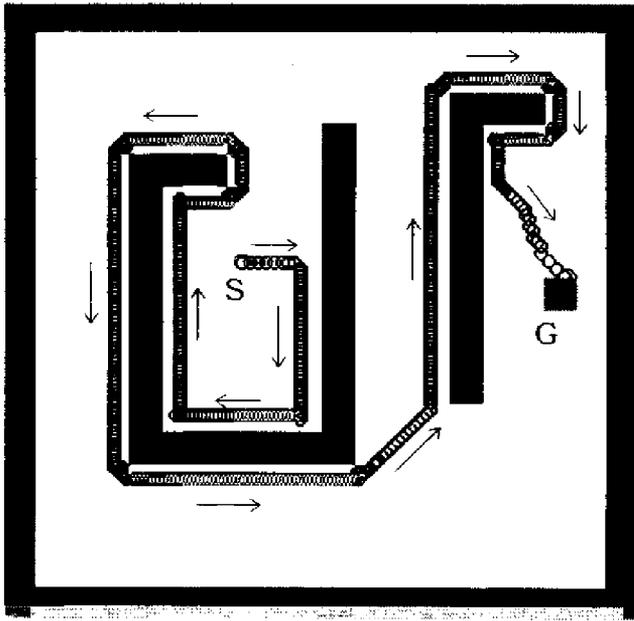


図9 センサノイズ無

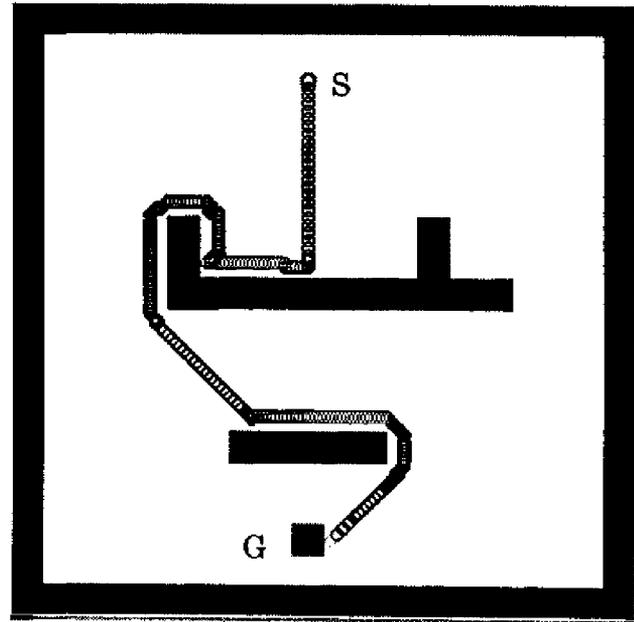


図12 ローカルマップ (センサノイズ有)

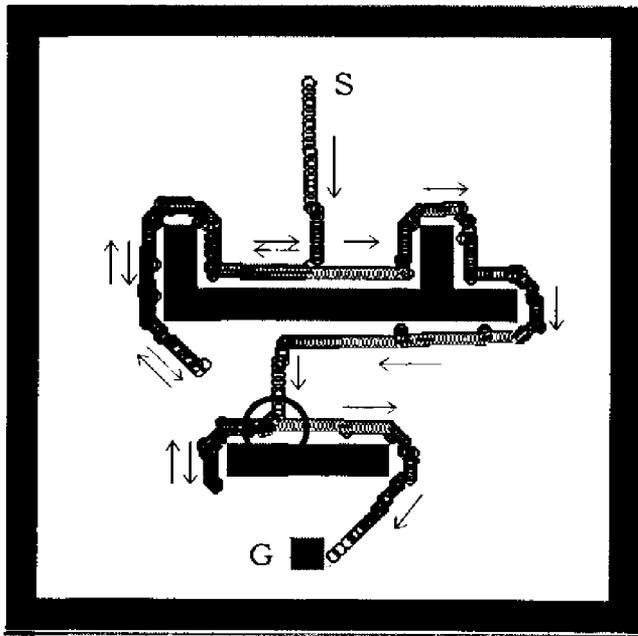


図10 センサノイズ有(2%ランダム)

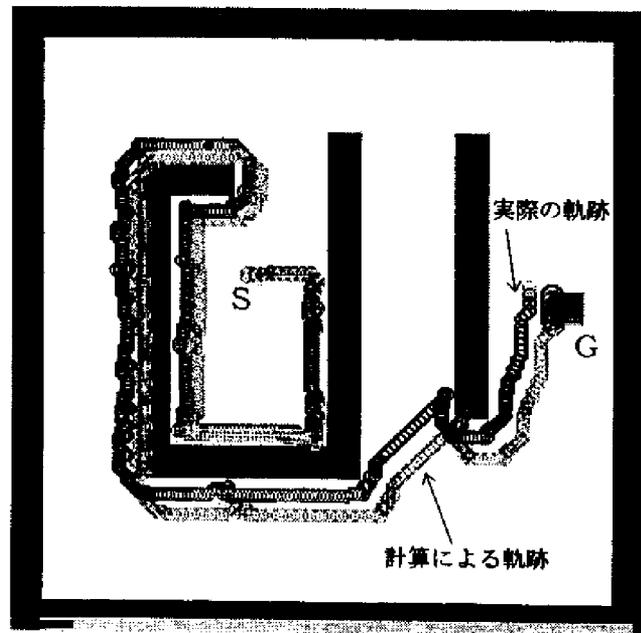


図13 移動誤差有(2%ランダム)

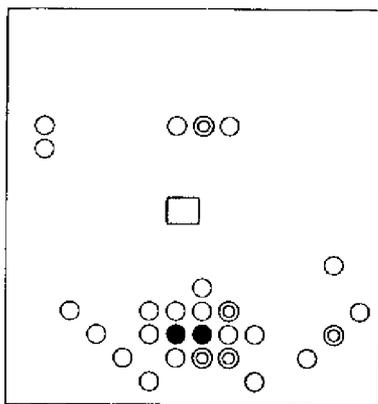


図11 センサ情報

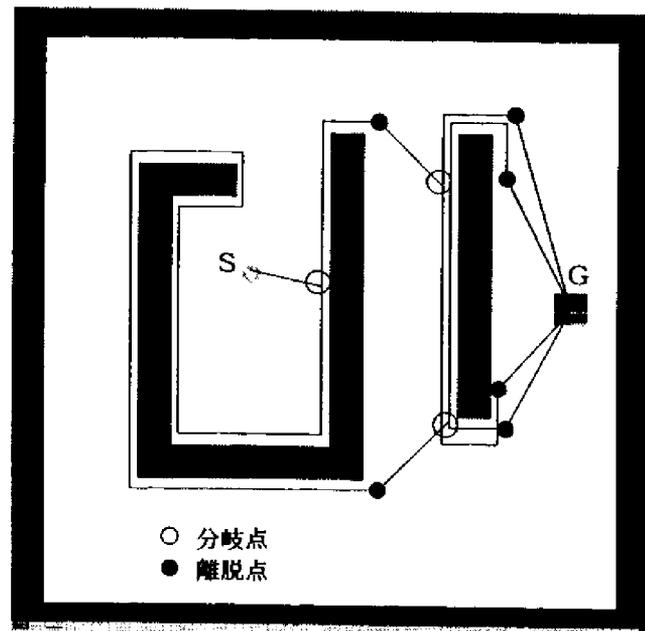


図14 ゴールへ至る経路

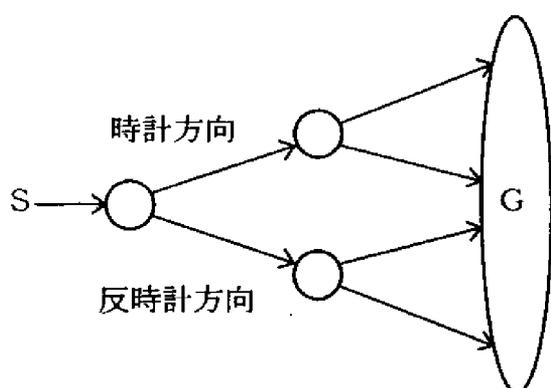


図 15 分岐点に対する 2分木

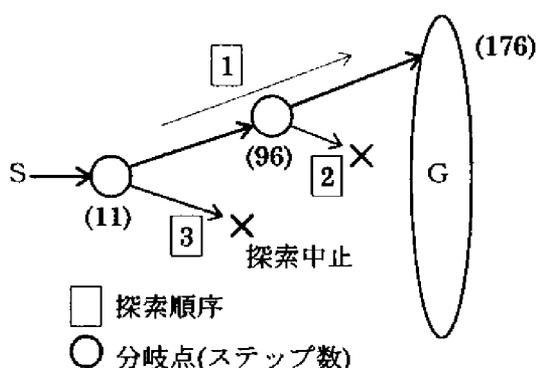


図 16 探索の様子

## 6. 最短経路探索の総探索時間の軽減

スタートからゴールまでのパスをすべて探索すると非常に効率が悪い。探索を効率的に行うため、発見的方法によってつぎのアルゴリズムを提案する。

各分岐点をノードとする 2分木を動的に生成する。例えば、図 14 の環境をすべて探索した場合の 2分木は図 15 となる。

ロボットはゴール方向へ進行中、前方をふさぐ障害物を発見すると分岐点を自動的に生成する。このとき、スタート地点から分岐点までの到達時間も記録する。ゴール時には、これまでの探索の結果得られた最小到達時間  $min\_time$  を記録する。2分木をサーチし、

分岐点  $i$  までの到達時間  $> min\_time$  ならば、分岐点  $i$  以降の探索を行わない。

別の経路探索時に、

経過時間  $> min\_time$  ならば、実行中の探索プロセスを中止する。

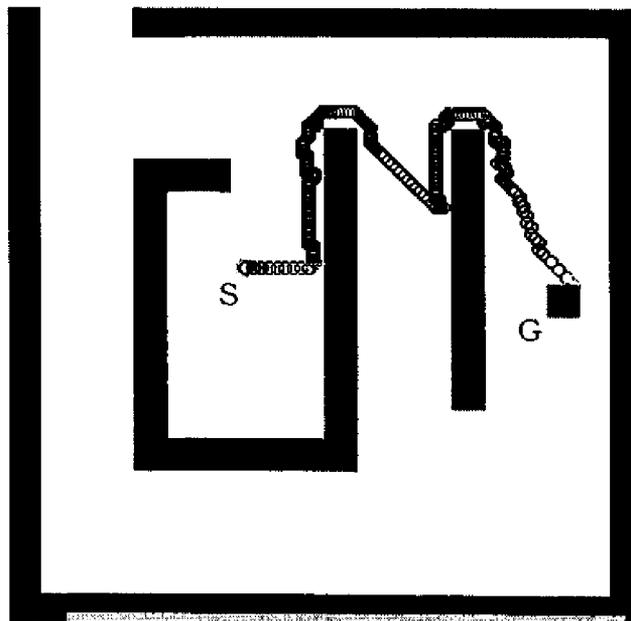


図 17 最短経路

以上の処理を未探索経路について、同様に繰り返す。

最短経路探索のシミュレーションの様子を図 16 に示す。すべての経路を最後まで探索することがないため、探索効率が良くなっていることがわかる。ロボットが図 14 の環境を探索後、発見した最短経路を図 17 に示す。このとき、最短経路は、時計方向→時計方向を選択すれば得られることがわかる。

## 7. おわりに

デッドロックフリー性能を有する移動ロボットナビゲータを提案した。また、ローカルマップによるナビゲーション性能の安定化と移動誤差に対するロバスト性に関する実験的検討を行った。さらに、動的 2分木生成とゴールへの最小到達時間の利用による最短経路探索の効率化を図った。シミュレーション実験により良好な結果が得られた。

今後の検討事項として、本ナビゲータを実機への適用すること、障害物の不連続点での実機の制御方法を検討すること、障害物のセンシング距離が伸びたときのロボットの動作について考察することなどが挙げられる。

---

参 考 文 献

- [1] 内田：「移動ロボットのための最短経路計画法」, 電学論, Vol.115-C, No. 9, pp. 1079-1085 (1995)
- [2] J. Borenstein and Y. Koren, "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots," IEEE Trans. Syst., Man, Cyber., vol. 19, no. 5, pp. 1179-1187, 1989
- [3] R. A. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," IEEE J. Robotics Automat., vol. RA-2, no. 1, pp. 14-23, 1986
- [4] A. Elfes, "Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation," IEEE J. Robotics Automat., vol. RA-3, no. 3, pp. 249-265, 1987
- [5] J. del R. Millan, "Rapid, Safe, and Incremental Learning of Navigation Strategies," IEEE Trans. Syst., Man, Cyber., vol.B-26, no. 3, pp. 408-420, 1996
- [6] H. R. Beom and H. S. Cho, "A Sensor-Based Navigation for a Mobile Robot Using Fuzzy Logic and Reinforcement Learning," IEEE Trans. Syst., Man, Cyber., vol. 25, no. 3, pp. 464-477, 1995
- [7] M. Dorigo and U. Schnepf, "Genetics-Based Machine Learning and Behavior-Based Robotics: A New Synthesis," IEEE Trans. Syst., Man, Cyber., vol. 23, no. 1, pp.141-154, 1993
- [8] 登尾：「未知空間におけるパスプランニングアルゴリズムを評価するための十分条件とそれにもとづくアルゴリズムの評価」, 情報処理学会論文誌, 33-8, pp. 1013-1021 (1992)