

# 距離時間変換による 移動ロボットの移動障害物回避動作生成

○大木健 (東北大) 永谷圭司(東北大) 吉田和哉(東北大)

## Motion Planning of Mobile Robots using Distance-Time Transform Method

**Abstract** — Motion planning with collision avoidance is one of the important issues for mobile robotics research. In dynamic environment, such as walking people, motion estimation of movable obstacles is the key to enable collision avoidance motion of mobile robots. In this research, we applied Distance-Time Transform (DTT) to perform motion estimation of movable obstacles, and path planning is executed in the DTT space. A validity of the proposed method was confirmed by our mobile robot simulator. In this paper, we introduce our motion planning method based on DTT, and report our simulation results.

**Key Words:** Motion Planning, Collision Avoidance, Distance-Time Transform

### 1. 序論

移動ロボットが、人などの移動障害物を回避しつつ、目的地まで移動することは、人の存在する環境下で活動する移動ロボットにとって、重要な能力である。筆者らの所属する研究室が参画している独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」では、被災地での情報収集活動を行うレスキューロボット(図1)を開発しており[1]、被災地へ向かうロボットには、被災地から避難する人を回避しつつ目的地へ移動する技術が求められている。本研究では、このような移動ロボットによる移動障害物回避の実現を目的とする。

移動障害物回避における先行研究として、Jaeらの研究が挙げられる[2]。Jaeらは、XY平面上において二次元運動する人との衝突を回避するために、XY軸に時間軸Tを加えたXYTの三次元空間を定義し、人の運動が同一方向に継続するとの仮定の下に、人の占有領域を傾斜楕円柱と仮定した。スタート位置からゴール位置まで、この傾斜楕円柱を回避する、三次元経路計画を行うことで、移動障害物を回避する経路を生成する。本研究では、基本的に、Jaeらの時間軸Tを加えた三次元空間を用いた手法を踏襲する。

一方、経路計画手法については、様々な手法が提案されてきたが、Jarvisらは、空間をグリッドで分割したうえで距離変換を行い、距離場における経路探索を行うことで経路計画を行う手法を提案した[3]。ここで、距離変換とは、図形の構造解析や画像処理に用いられる手法の一つである[4]。XY平面をグリッドで分割したものを以後レイヤと呼ぶ。

レイヤに距離変換を行い、経路を探索した一例を図2に示す。ここで、Sをスタートグリッド、Gをゴールグリッド、緑色のグリッドを障害物占有グリッドとする。ここで、スタートグリッドを0とし、その隣接グリッドに対し、距離値を与える。これを繰り返すことで、レイヤ上の全ての障害物非占有グリッドに、スタートグリッドSからの距離値を与えるのが距離変換である。そして、その上で、ゴールグリッドGから、周囲8グリッドの値をみて、最急

降下方向のグリッドを選択し、そのグリッドへ移動する。これを繰り返すことで、スタートグリッドSに達し、経路探索が完了する。

Guptaらは、この手法を時間方向に重ねることで、移動障害物の将来位置を推定した上で、三次元的に距離変換および経路探索を行う手法を提案し、シミュレーションを行った[5]。

距離変換による経路計画の利点の一つは、ゴールまでの経路が存在する場合、局所解に陥ることなく、必ず目標位置に達する経路が求まる点である。ただし、この手法では、経路探索結果が、実際の平面において、必ずしも最短経路とはならないという問題点が存在する。そこで、本研究では、この問題を解決しつつ、XYTの三次元空間内で距離変換を行うことで、移動障害物回避経路を探索するアルゴリズムを提案する。

本稿では、XYTの三次元空間内での距離変換を用いた移動障害物回避手法について説明し、シミュレーションによりその手法の有効性を確認したので、これを紹介する。



Fig.1 Rescue Robot "KENAF"

15	14	13	12	11	10	9	10	11	12
14	13	12	11	10	9	8	9	10	11
13	12	11	10	9	8	7	8	9	10
12	11	10	9	8	7	6	7	8	9
11	10	9	8	7	6	5	6	7	8
10	9	8	7	6	5	4	5	6	7
9	8	7	6	5	4	3	4	5	6
8	7	6	5	4	3	2	3	4	5
7	6	5	4	3	2	1	2	3	4
6	5	4	3	2	1	0	1	2	3

Fig.2 Generated Path  
in Distance Transformed Layer (2D)

## 2. 移動障害物回避手法の提案

### 2.1 移動障害物回避手法の概要

本研究で提案する移動障害物回避アルゴリズムは、以下の3つのブロックで構成される。

- (A) 障害物の検出と行動推定
- (B) 未来方向への距離時間変換
- (C) 局所的な準最短経路探索

以上の演算は、図3に示す距離時間積層レイヤという枠組みの中で行う。これは、ロボットや固定/移動障害物が存在するXY平面を時間経過方向に下層から上層へ積層したものであり、複数の「過去レイヤ」、1つの「現在レイヤ」、複数の「未来レイヤ」で構成される。各レイヤは、時間を単位とするレイヤ時間幅を有する。この距離時間積層レイヤ上で、(A)~(C)を実行することで、ロボットの走行経路を決定し、ロボットは経路追従走行を行う。以上を一定周期で繰り返す。

### 2.2 (A) 障害物の検出と行動推定

(A)では、過去レイヤに蓄積された障害物の位置履歴から障害物及びその行動を検出し、さらに、未来での障害物位置を推定することを目的とする。

本研究では、問題の単純化のため、円柱形移動障害物のみを対象とする。まず、蓄積したセンサデータより、検出・推定した障害物の重心位置及び概算半径の履歴を生成する。次に、移動障害物が将来にわたって形状変化せず、かつ、過去の行動を継続するという仮定のもとに、複数の過去時において検出した障害物の重心位置及び概算半径から、未来における障害物存在位置を推定し、その位置を含む各未来レイヤ上のグリッドを障害物占有グリッドとする。

こうして生成した障害物占有グリッド群を、ロボット半径分だけ膨張させることで、大きさをもつロボットの移動を質点の移動として考えることが可能となる。このように形成する膨張障害物占有グリッド群を障害物空間と呼び、それ以外の空間を自由空間と呼ぶ。以上のプロセスにより、各未来レイヤは、障害物空間と自由空間に分けられる。

### 2.3 (B) 未来方向への距離時間変換

距離時間変換とは、XY方向への2次元距離変換を時間方向Tに拡張した変換であり、未来レイヤ上のグリッドに、距離時間変換値(Distance Time Transform Value: DTTV)を与えるものである。DTTVとは、図2における距離値を、時間方向に帯状に振り分けたものと表現することができる。距離時間変換によって、ロボットの移動速度から、それぞれの未来レイヤで到達可能なグリッド群に対し、DTTVが与えられる。

未来方向への距離時間変換のアルゴリズムは、次の通りである。

まず、各未来レイヤにおいて、そのレイヤで扱うDTTV範囲を求める。DTTV範囲は、そのレイヤが

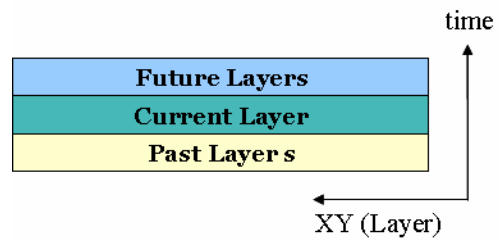


Fig.3 Distance Time Layer Stack

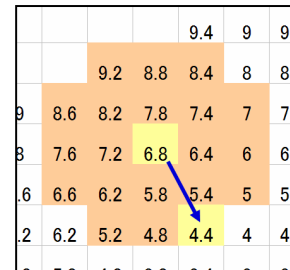


Fig.4 Local Semi-Shortest Path Search in 2D Layer

扱う未来時と、そのレイヤが有するレイヤ時間幅、及びロボットの移動速度によって決定する。続いて、そのレイヤで DTTV を有する全グリッドを、DTTV 範囲内の最小値で初期化する。その上で、先に求めた DTTV 範囲内で二次元距離変換を行う。最後に、DTTV を有する全てのグリッドを、直上グリッドにコピーする。このとき、直上グリッドが障害物空間である場合には、コピーを行わない。

以上のプロセスを最下層未来レイヤから、未来方向に繰り返すことにより、未来レイヤは、障害物空間と、到達可能な自由空間、到達不可能な自由空間に分けられる。

### 2.4 (C) 局所的な準最短経路探索

(A),(B)により、距離時間積層レイヤ上の未来レイヤには、到達可能な自由空間が定義される。ここで、到達可能な自由空間内で、局所的な最短経路探索を利用することで、移動障害物を回避するロボットの動作を計画することができる。

まず、二次元 XY 平面における局所準最短経路探索について述べる。通常距離変換による経路探索手法では、現在位置から周囲 8 グリッドの中で最小値を有するグリッドを探索するため、計画される経路は、水平、垂直、または斜め 45 度の経路となり、角度分解能は 8 となる。これに対し、本研究では、一定の探索半径  $R_s$  内の最小値を有するグリッドを選択することで、局所準最短経路探索を行う。言い換えれば、探索半径を大きくすることで、経路の角度分解能を向上させる。図4における青いベクトルを局所探索ベクトルと呼び、これは自由空間内のグリッドの中心位置を始点、終点とする。探索半径を大きくすると角度分解能が向上する一方、探索半径内に障害物空間が存在する可能性が増すため、探索半径の増大によって必ずしも経路が最短に近づくとは限らない。

次に、三次元 XYT 空間の場合における局所準最短経路探索について述べる。まず、未来レイヤの中

から、ゴールグリッドが DTTV を有する、現在に最も近い未来レイヤを探す。続いて、その未来レイヤの直下層にむけて局所準最短経路探索を行う。直下層で局所準最短経路が探索できなかった場合、同一層で探索を行う。このようにして探索されたグリッドを記憶しておき、以上の探索作業を、現在レイヤに達するまで繰り返すことによって、ゴールグリッドからロボットの現在位置に至る経路を求める。

### 3. 移動障害物回避手法の実装

#### 3.1 対象とするロボット

本研究では、対象とする移動ロボットを、当研究室が所有するクローラ型ロボット KENAF (図 1) とする。KENAF は、2つのメインクローラと角度の変更が可能な4つのサブクローラによって構成され、高い不整地走行能力を有しているが、本研究においては水平面移動のみを想定するため、サブクローラは可動させないものとする。また、KENAF には、北陽電機社製レーザ式測域センサ UTM-30LX を車体中心に進行方向水平に搭載する。UTM-30LX は、ロボット前方方向を中心に左右 135 度ずつ、合計 270 度の範囲にわたり、30m 以内の距離情報を取得することができる。なお測定は 0.25[deg]刻みである。

#### 3.2 移動ロボットシミュレータ

再現性のある移動障害物の動作を用いて回避アルゴリズムの評価を行うため、KENAF の動作プログラムのコードをそのまま利用し、仮想環境内のロボットの動作を再現することが可能な簡易シミュレータ KENAF Simulator (K-SIM)を開発した。K-SIM では、仮想 KENAF 上の仮想距離センサによって、任意のサイズの六角柱及び直方体形状の仮想障害物を検出することが可能である。K-SIM 上では、実機の動作プログラムを実機上で実行した場合と同等の結果をシミュレートすることが可能であり、K-SIM で動作した動作プログラムを再コンパイルするだけで、そのまま実機での実行が可能となる。

#### 3.3 移動ロボットシミュレータの動作検証

図 5 に示す環境において固定障害物を回避する動作検証を、K-SIM 上及び実環境において行った。その結果、双方の環境において、同様の障害物回避経路を算出し、その経路に沿って回避動作を行っていることを確認した。

#### 3.4 距離時間積層レイヤの設計

2.4 節で述べたように、現在位置からゴールグリッドまでの間の空間は、距離時間変換された、到達可能な自由空間である必要がある。また、2.3 節で述べたように、各レイヤが扱うことができる走行経路長は、各レイヤのレイヤ時間幅の大きさにによって決まる。すなわち、レイヤ時間幅を大きく取れば、そのレイヤで距離時間変換できる帯状領域の幅が

広がる。一方で、その移動障害物が存在する場合、その時間幅において移動障害物が存在する領域が広がるため、生成される障害物回避経路の経路長が長くなるおそれがある。

以上を考慮し、距離時間積層レイヤについては、下層(過去)から上層(未来)の順に、[A]過去レイヤ5層、[B]現在レイヤ1層、[C1]近未来レイヤ5層、[C2]遠未来レイヤ5層の、合計4種16層のレイヤを配した。

また、本実装では、現在位置から半径 15m 範囲内に障害物、ゴールグリッドが存在する環境を想定する。そのため、レイヤ時間幅に関しては、過去レイヤ、現在レイヤ、近未来レイヤのレイヤ時間幅を 1[sec]、遠未来レイヤのレイヤ時間幅を 10[sec]とした。また、KENAF の最大移動速度を 300 [mm/sec]とした。これにより、一層のレイヤでロボットが移動可能な最長距離は、近未来レイヤでは 300[mm]、遠未来レイヤでは 3000[mm]となる。よって、最遠未来で到達可能な最大距離は 16.5[m]となる。

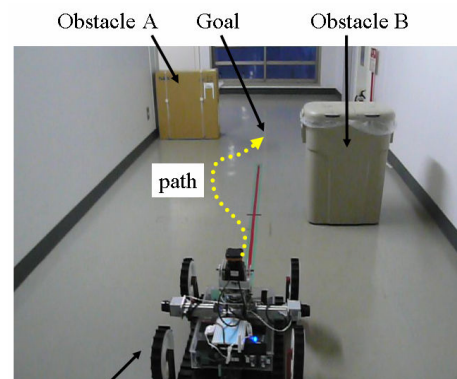
KENAF の半径は、500[mm]とした。グリッド一辺のサイズは、KENAF のサイズと計算負荷の軽減を考慮し、100[mm]とした。また、過去方向への準最短経路探索における探索ベクトルの大きさは、300[mm]とした。アルゴリズムの実行周期は 1[sec]とした。

## 4. シミュレーション実験

### 4.1 実験環境

K-SIM の仮想環境において、ロボット前方を左から右に横切るように移動する六角柱型障害物が存在する環境を想定する。ロボットはスタート位置(0, 0)[m]から、ゴール位置(5.5, 0)[m]を目指して走行する。移動障害物はロボットのスタートと同時に(3, 3)[m]から、y 軸負方向に 150[mm/sec]で移動する。計算領域は、端点がそれぞれ(8.5, -3.5),(8.5, 3.5),(-1.5, 3.5),(-1.5, -3.5) [m]で定義される長方形領域とする。

使用する計算機の CPU は、Intel Pentium DualCore E2160(1.8GHz)である。なお、移動障害物の動作については、K-SIM とは別プロセスで、周期 1 秒で実行する。



Robot at start position  
Fig.5 Generated Path in Real Environment

## 4.2 実験結果

図6は、シミュレーション実行開始の2[sec]後に、ロボットが生成した経路を赤線で示したものである。また、同時刻において、全レイヤでの障害物空間、自由空間をXYT3次元空間で示したのが図7である。図7の白色グリッドが過去に検知した障害物、薄い灰色及び濃い灰色グリッドが、未来の障害物占有グリッド及びその膨張グリッドを表している。また、図8は、一つの遠未来レイヤでの距離時間変換値と生成経路を色別で表したものであり、緑色領域が、本レイヤにおいて距離時間値を有する領域、青色領域が、既に下層で距離時間変換された領域である。

ロボットは、過去レイヤ及び現在レイヤのセンサーデータから障害物の未来レイヤにおける位置を推定し、障害物を回避する経路を生成した。その後、移動と経路更新を繰り返し、障害物左側に回り込みながら障害物を回避してゴールグリッドに到達した。提案アルゴリズムを実行したプロセスの1周期の実行に要した時間は、0.1秒から0.7秒の範囲内であった。

## 5. 結論

提案手法では、過去のセンサ履歴から移動障害物の未来位置を推定し、距離時間変換によって到達可能な自由空間を求め、その自由空間内で準最短経路探索を行うことにより、移動障害物回避動作を生成する。実機実験ならびにシミュレーションにより、提案手法が実装可能であり、移動障害物を回避可能であることを示した。今後の課題として、障害物の未来位置の推定精度向上が挙げられる。

## 6. 謝辞

本研究は、NEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の支援を受けて実施されました。

### 参 考 文 献

- [1] “被災建造物内移動RTシステム 閉鎖空間内高速走行探査群ロボット”, <http://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/kaiken/BE/nedopressorder.2009-02-12.0806281118/irs.pdf>
- [2] Jae Hoon Lee and Abe, K. and Tsubouchi, T. and Ichinose, R. and Hosoda, Y. and Ohba, K. : Collision-free navigation based on people tracking algorithm with biped walking model, IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, (2008)
- [3] R.A. Jarvis and J.C. Byrne, "Robot Navigation: Touching, Seeing and Knowing", Proceedings of 1st Australian Conf. on Artificial Intelligence, (1986)

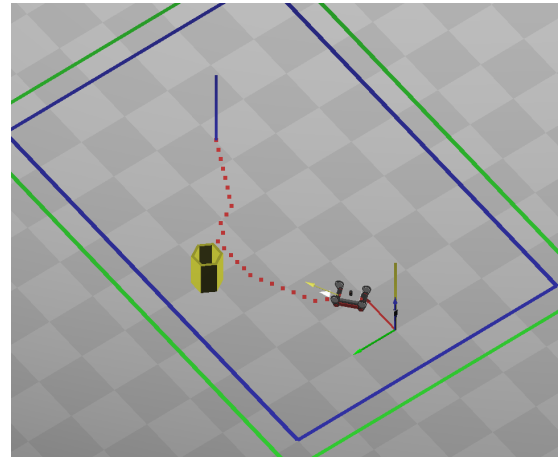


Fig.6 Generated Path to Avoid Moving Obstacle

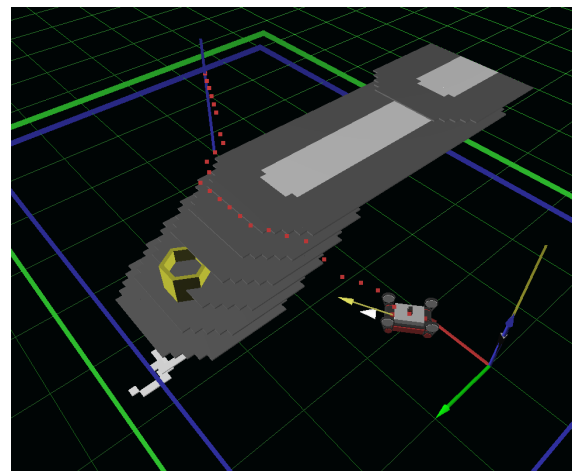


Fig.7 Generated 3D Path and obstacle spaces

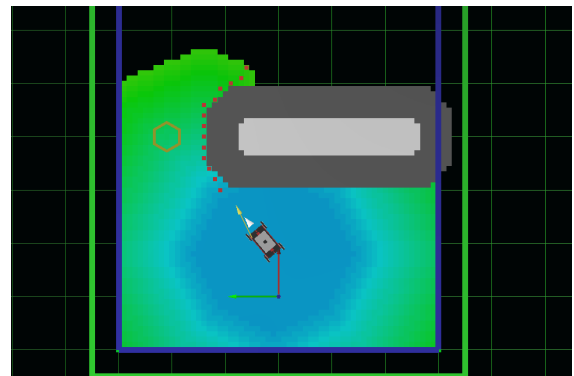


Fig.8 Distance Time Transformed Area and Obstacle Occupied Area at the Far Future Layer

- [4] 平野靖, 鳥脇純一郎: 距離変換を用いた図形の構造解析手法, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY Vol.20 No.1, (2002)
- [5] Om K. Gupta and Ray A Jarvis, "Optimal Global Path Planning in Time Varying Environments Based on a Cost Evaluation Function", Proceedings of the 21st Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence: Advances in Artificial Intelligence , (2008)