

自律移動ロボットの階層型軌道計画
—ファジィ意思決定による小目標点・経路点決定—

平成18年度

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 電気電子工学専攻

宮崎 真吾

—修士学位論文—

自律移動ロボットの階層型軌道計画
—ファジィ意思決定による小目標点・経由点決定—

Hierarchical Trajectory Planning
for Autonomous Mobile Robots
—Sub-Goal Points and Via Points Decision
by Fuzzy Decision Making—

2007年3月

三重大学大学院 工学研究科
博士前期課程 電気電子工学専攻

宮崎 真吾



目次

第 1 章 緒言	1
第 2 章 自律移動ロボットの概要	4
2.1 移動ロボットの機構	4
2.2 全体のアлゴリズム	6
2.3 環境認識	7
2.3.1 地図生成	7
2.3.2 障害物端・開口部検出	8
2.4 軌道計画	10
2.4.1 ファジィ意思決定の基礎論	10
2.5 ロボットの制御	15
2.5.1 車輪の角速度指令の生成	16
2.5.2 車輪の速度制御	17
第 3 章 ファジィ意思決定を用いた軌道計画	20
3.1 軌道計画の流れ	20
3.2 小目標点決定	22
3.2.1 開口部決定	22
3.2.2 位置決定	26
3.3 経路点決定	28
3.3.1 経路点の決定範囲	28
3.3.2 経路点決定のためのファジィルール	30
3.3.3 重みの決定	32

目次

3.4 経路生成	35
3.4.1 clothoid 曲線	35
第 4 章 実機による誘導実験	39
4.1 実験環境と条件	39
4.2 誘導実験結果および考察	41
4.3 他の環境での誘導実験	45
第 5 章 結言	49
付録	51
A 移動ロボットのパラメータ	51
B ファジィ意思決定	52
参考文献	53
謝辞	55
論文目録	56

第1章

緒言

これまで、工場など製造業分野で作業するロボットの稼働数が増加してきた。しかし、近年では、製造業分野で作業するロボットだけでなく、病院・福祉施設での介護支援ロボット、オフィスでの運送・清掃ロボットなどの非製造業分野で作業するロボットが期待されている[1]。このような環境での作業が期待されるにつれ、広範囲かつ人間中心の著しく変化する環境(未知環境)での移動を行えるロボットが求められる。このような環境には、工場のようにレールやラインを設置することは困難である。また、予めロボットに対して環境情報を与えておくことは不可能である。したがって、移動ロボット自身が周囲の情報を認識し、計画し、行動することが求められる。そこで、このようなことの出来る、自律性を持った自律移動ロボットが有効である[2]。

未知環境下において、自律移動ロボットが与えられた目標位置に走行し到達するためには、次に挙げる3つのステップを繰り返す。第1ステップにおいて、周囲の環境情報を取得する環境認識を行う[3][4]。第2ステップにおいて、取得した環境情報を基に軌道計画を立てる[5][6][7]。第3ステップにおいて、軌道計画によって生成された軌道に追従するようにロボットの制御を行う[8][9]。本研究ではその中でも軌道計画について研究を行ってきた。

軌道計画において重要なことは、目標位置に到達するように計画することだけでなく、人間や周囲の環境に接触して危害を加えないように安全性を考慮することは非常に重要となってくる。そこで、このようなことを考慮した軌道計画に関する研究が多くなされてきた。その方法の一つに、ポテンシャル法を用いた軌道計画がある[5]。この方法は、障害物からの斥力と目標位置からの引力から成るポテンシャルによって軌道を計画するものである。非常に簡単な手法ではあるが、ポテンシャルの低い所を軌道として走行するので移動ロボットの挙動が予測できない。また、局所最小解に陥ってしまい、その場でとどまってしまうという問題がある。この問題に関してはいくつかの解決策[5]がなされている。しかし、既知環境下における研究である。また他の研究では、既知環境下において、空白領

域(障害物のない領域)にサブゴールを設定する方法である[6]. この方法では, グラフ理論を用い, 凸多角形領域のサブゴールを目標位置まで複数設定する. 設定された複数のサブゴール列からなるおおまかな軌道(概略軌道)を生成する. ここで生成された軌道は幅を持った軌道でありその何処を通れば良いのかについては述べられていない. そこで, その概略軌道から何処を通るのかを決定する研究もなされている[7]. この方法は, 概略軌道の何処を通るのかをコスト関数を設定することでユーザ仕様に合わせた軌道を計画できるという利点がある. 例えば, 短距離軌道や速度に条件を持たせるなどの仕様を与えることができる. また, 自動ドアなどの動的環境下での有効性も言われている. しかし, どれだけ近づいたら自動ドアが開くのかや自動ドアの開く速度が知られているという条件で用いられている. また, 環境情報が与えられている条件下で有効性が言われているだけである. さらに, 軌道生成を行うのに要する時間は約 2[sec]である. したがって, 著しく変化する未知環境下での移動には不向きである. そこで, 本研究では簡単なアルゴリズムにより, 動的環境下においても安全かつ出来るだけ短時間で走行できる軌道計画法について提案する. しかし, 本研究では一定速度で走行させることを前提とするので, 出来るだけ短時間で走行できる軌道を, 出来るだけ短距離で走行できる軌道と捉え軌道を計画する.

本研究で提案する軌道計画では, (1)小目標点決定, (2)経由点決定, (3)経路生成の 3 つを階層的に構築し, ある周期ごとに繰り返すことで動的環境下にも走行可能となる.

- (1)小目標点決定では, 環境認識で得られた情報から複数存在する開口部(障害物の角と角の間)からどの開口部を通るかをファジィ意思決定により決定する. 次に決定された開口部の何処を通るのかをファジィ意思決定により決定する. このようにして決定された位置が小目標点である.
- (2)経由点決定では, 先に決定された小目標点とロボットの位置との間に対しどのように走行するのかファジィ意思決定により決定する.
- (3)第 1 ステップにより決定された小目標点と第 2 ステップにより決定された経由点との間を滑らかな軌道が生成できることで知られている clothoid 曲線と直線軌道により補間し経路生成を行う.

本論文の構成は以下の通りである. 第 2 章で自律移動ロボットの概要と全体アルゴリズムについて説明する. 続いて, 第 3 章では提案手法の軌道計画について説明する. ここではまず, 本提案手法で用いるファジィ意思決定の基礎について説明し, 階層的に構築された軌道計画のアルゴリズムについて説明した後, 提案手法である小目標点・参照点決定について説明する. その後, clothoid 曲線

と直線軌道による経路生成について説明する．第4章では，本提案手法の軌道計画を適用し自律移動ロボットの誘導実験を行い，有効性を示す

第2章

自律移動ロボットの概要

本章では自律移動ロボットの概要について説明する。最初に、本研究で用いる移動ロボットの機構について説明する。その後、自律移動ロボットを目標位置まで走行させるための全体アルゴリズムについて説明する。

2.1 移動ロボットの機構

ロボットの移動機構として脚型のものや、車輪型のものが多く研究されている。それぞれには利点・欠点がある。

<脚型歩行ロボット>

人間のように歩行するロボットであるので、2次元平面だけでなく階段など段差が存在するような3次元空間での移動が行える利点がある。しかしながら、このようなロボットを制御することは非常に難しいという欠点もある。

<車輪型ロボット>

脚型歩行ロボットに比べロボットの制御は比較的簡単で目標位置まで誘導できる。しかしながら、車輪での移動となることから3次元空間に対して走行することは困難である。

本研究では、制御が比較的簡単であるという観点から二輪の車輪を有する車輪型の移動ロボットを対象とする。使用した移動ロボットを Fig2.1 に示す。

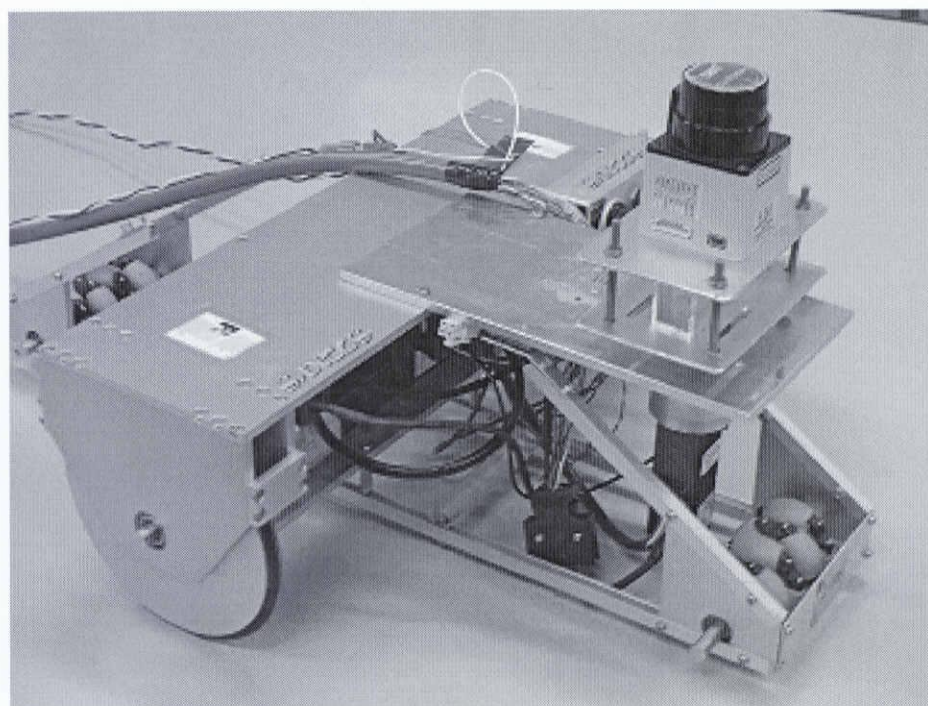


図2.1 自律移動ロボット
Fig. 2.1 Autonomous mobile robot

2.2 全体のアルゴリズム

自律性を持ったロボットが未知環境下で作業するためには、

検出 → 認識 → 計画 → 行動

を繰り返し行うことが必要である[1]。このことを本研究で対象にする自律移動ロボットについて考えると、検出・認識は外界センサによる周囲の環境情報の取得と対応し、計画はどのように走行するかを決定する軌道計画と対応する。そして、行動は先に計画された軌道に追従するように左右の車輪を制御するロボットの制御に対応する。

環境認識，軌道計画，ロボットの制御を階層的に構築した本研究での全体アルゴリズムについて Fig.2.2 に示す。このように階層的に構築することで，ロボットの制御により生じる誤差，走行中に起こるスリップなどによる誤差，さらに，未知環境下や動的環境下に対しても対応可能である。

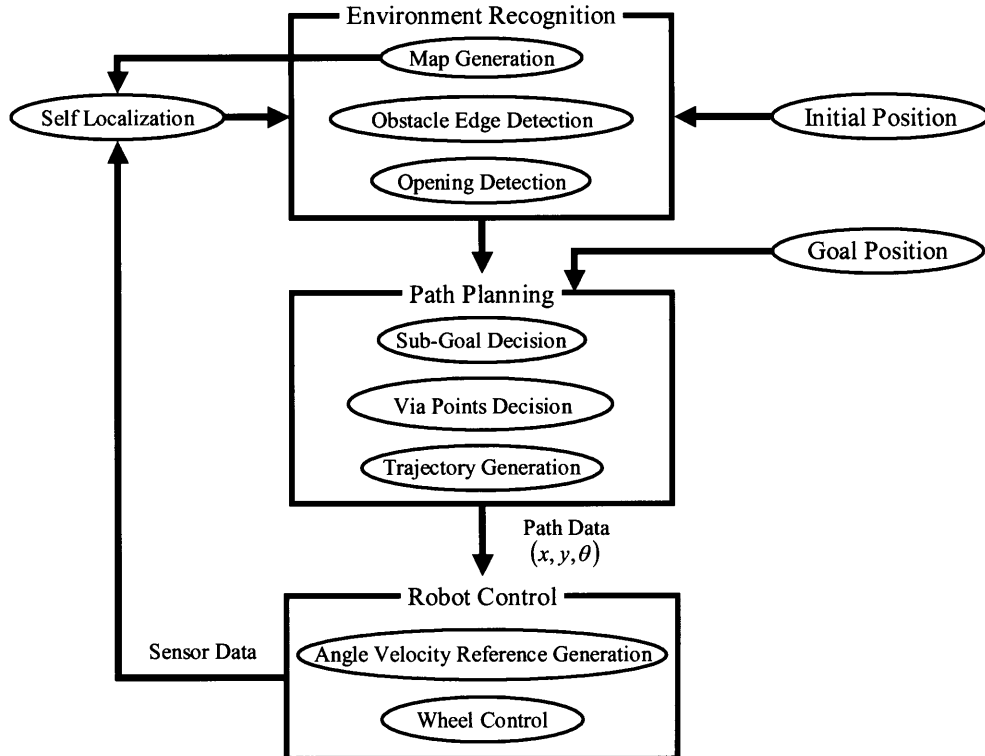


図2.2 自律移動ロボットの概念図

Fig. 2.2 Outline of Autonomous Mobile Robot

2.3 環境認識

自律移動ロボットが未知環境下で移動するためには、周囲の環境情報を取得する環境認識が必要となる。人間はどこかに行く際、眼により周囲の環境情報を取得しながら目的地に向う。ロボットの眼に対応するものとして、多くの情報を取得できるカメラや、障害物までの距離を計測できる距離センサがよく用いられている。そこで本研究では、周囲の障害物までの距離を短時間で計測できるレーザーレンジファインダ(LRF)を用いる。このセンサにより計測した障害物までの距離から地図生成を行う。また、その情報から軌道計画に用いる障害物の角である障害物端の検出を行い、複数検出される障害物端の組み合わせによりできる開口部の検出を行う。

2.3.1 地図生成

LRFにより取得した障害物までの距離から地図生成を行う。走行しながら地図生成を行っていくのだが、それぞれの位置で生成した地図を一つの地図にする際、2.3.2で説明する対応する障害物端をマッチングすることにより行う。実際にLRFにより距離測定を行って地図生成した結果をFig.2.3に示す。

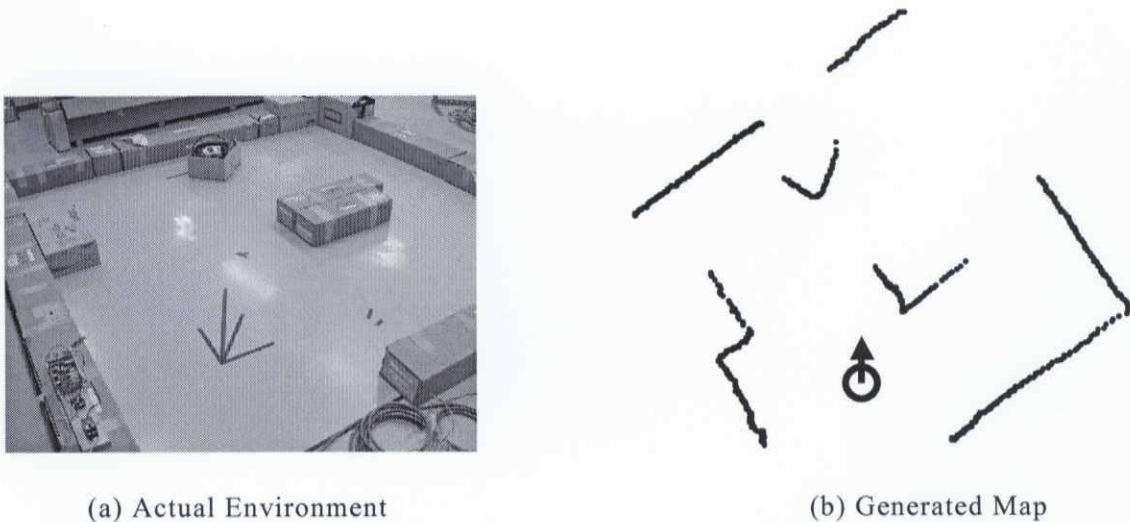


図2.3 地図生成
Fig. 2.3 Map Generation

2.3.2 障害物端・開口部の検出

障害物の角である障害物端は、計測された障害物までの距離の増減により検出する。障害物端を3つのタイプで定義し、検出する。タイプ1の障害物端は Fig.2.4(a) に示すように、障害物までの距離が減少してある位置を境に増加する点と定義する。また、タイプ2の障害物端は Fig.2.4(b)に示すように、障害物までの距離が急激に減少する点と定義する。最後に、タイプ3の障害物端は Fig.2.4(b)に示すように、障害物までの距離が急激に増加する点と定義する。ロボットの右方向から見て1つ目の障害物端がタイプ2である場合、境界面上に仮想端点を設置する (Fig.2.4(b))。また、右方向から見て最後の障害物端がタイプ3である場合、境界面上に仮想端点を設置し、その間を開口部とする。ここで仮想端点は、ロボットと障害物端を結ぶ直線と障害物端で直行する直線と境界面との交点に設置する。

次に、このようにして検出した障害物端の組み合わせにより出来る開口部を検出する。ただし、開口部となりうる障害物端の組み合わせは障害物端のタイプにより4つに分け検出する。開口部となりうる組み合わせは、`type1-type1`, `type2-type1`, `type1-type3`, `type2-type3` がある。

Fig.2.3 に示した地図において、検出される障害物端を Fig.2.5 に示し、障害物端の組み合わせにより出来る開口部も合わせて示す。検出された開口部を用いて軌道計画を行う。

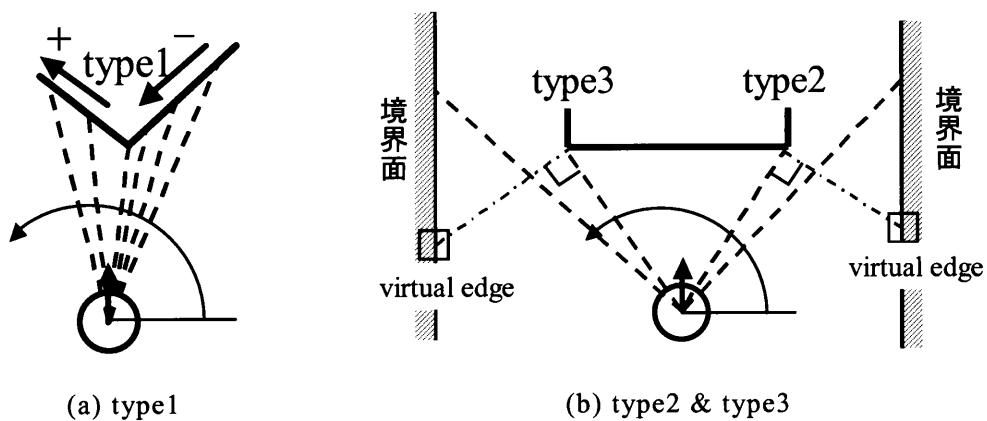


図2.4 障害物端のタイプ
Fig. 2.4 Types of Obstacle Edges

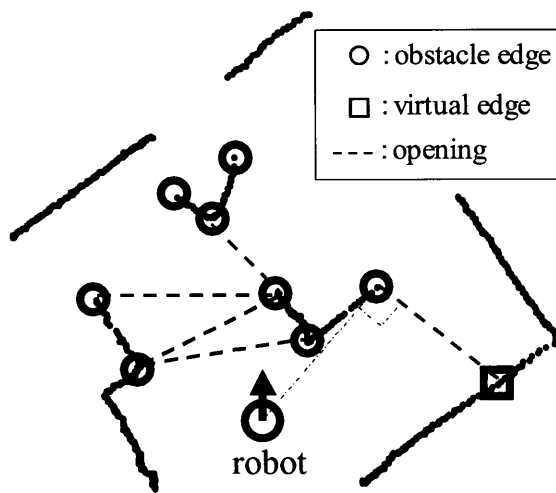


図2.5 検出される障害物端と開口部
Fig. 2.5 Detected Obstacle Edges and Openings

2.4 軌道計画

提案する軌道計画法は、まず、小目標点決定により大まかな軌道計画を行い、その後、経路点決定を行い小目標点までの詳細な軌道計画を立てる。決定された小目標点・経路点を clothoid 曲線と直線軌道により補間して経路生成を行う。

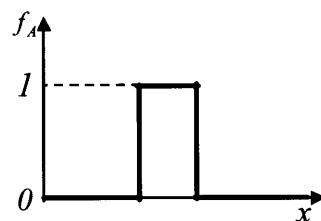
ここで、小目標・経路点はファジィ意思決定を用いることで決定する。ここでは、軌道計画を説明するためにファジィ意思決定の基礎論について述べる。また、軌道計画については第3章において詳しく説明する。

2.4.1 ファジィ意思決定の基礎論[10][11]

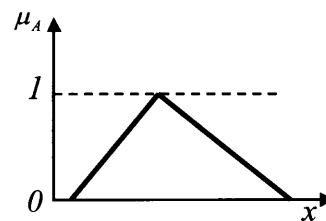
現実の意思決定の多くは、目標・制約、一連の行動などが正確に規定されていない環境の下で行われる。このように、不確かさを定量的に扱うためにファジィ集合の概念を用いる。このファジィ集合の概念を用いることにより、不確かな目標・制約などをファジィ的に特性づけ定量的に扱うことが出来る。

<ファジィ集合論>

Fig.2.6 に示すように、一般的な集合(クリस्प集合)の特性関数は $f_A: X \rightarrow \{0,1\}$ であり、要素が明確に属していれば1、属していなければ0の2値をとる。それに対し、ファジィ集合は $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ なるメンバーシップ関数により特性づけられ、0~1.0の任意の実数を取り、集合に属す度合いを示し、1に近いほど属す度合いは高く、逆に0に近いほど属す度合いは低い。この値 $\mu_A(x)$ をグレードと呼ぶ。



(a) Crisp Set



(b) Membership Function

図2.6 ファジィ集合

Fig. 2.6 Fuzzy Set

<ファジィ集合の基礎演算>

ファジィ集合 A, B のメンバーシップ関数を Fig.2.7 に, 集合 A, B の和集合, 共通集合はそれぞれ(2.1), (2.2)式, Fig.2.8 と定義される.

- ・ 和集合

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (2.1)$$

- ・ 共通集合

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (2.2)$$

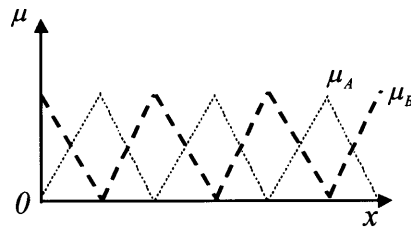
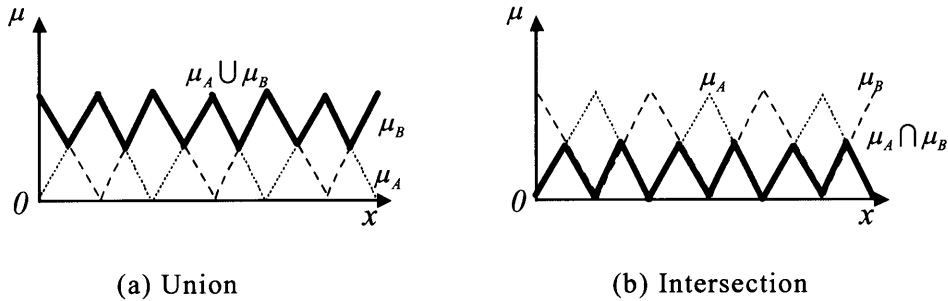


図2.7 メンバーシップ関数
Fig. 2.7 Membership Function



(a) Union

(b) Intersection

図2.8 和集合と共通集合
Fig. 2.8 Union and Intersection

<ファジィ意思決定>

意思決定の問題を取り扱う際，決定過程において次の3つの基本的な事柄を考慮する必要がある．

- ・ 意思決定の対象となる集合
- ・ 各々の対象を選ぶ際の目標・制約の集合
- ・ 選んだ対象に対して利得を割り当てる評価関数

ファジィ意思決定では，目標・制約の集合をファジィ集合によって表す．決定過程における評価関数は意思決定の対象を評価によって順序づけるものであるが，ファジィ集合のメンバーシップ関数は同様の役割を果たす．ファジィ意思決定は，対象となる集合を $X=\{x\}$ ，ファジィルール(目標・制約とそれを定義するメンバーシップ関数から)により求めたファジィ量を $\mu(x)$ とすると，(2.3)，(2.4)式により定義される．

$$D(x) = \min(\mu_1(x), \mu_2(x), \mu_3(x), \dots, \mu_n(x)) \quad (2.3)$$

$$x^* = \arg(\max(D(x))) \quad (2.4)$$

ここで， n はファジィルールの数とする．

ファジィ決定 $D(x)$ はファジィルールの共通集合として与えられ， x^* はファジィ決定 $D(x)$ 中で最大のファジィ量を持つ対象である．このファジィ意思決定の方法を min-max 法と呼ぶことにする．

<min-max 法>

ファジィルール A, B, C, D に対する x のファジィ量 μ を Table.2.1 に示す. それぞれの x に対してファジィ量の最小なものを選び出す. 選び出されたファジィ決定 $D(x)$ を Table.2.2 に示す. その後, Table.2.2 から最大であるファジィ量を選び出す. このようにして選び出された x がファジィ意思決定によって選び出された対象となる(例の場合 $x^*=5$).

表2.1 ファジィルールに対するファジィ量

Table 2.1 Value of Fuzzy for Fuzzy Rule

x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
μ_A	0	0.1	0.4	0.8	1.0	0.7	0.4	0.2	0	0
μ_B	0.1	0.6	1.0	0.9	0.8	0.6	0.05	0.3	0	0
μ_C	0.3	0.6	0.9	1.0	0.8	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1
μ_D	0.2	0.4	0.6	0.7	0.9	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2

表2.2 ファジィ決定 $D(x)$ Table 2.2 Fuzzy Decision $D(x)$

x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D	0	0.1	0.4	0.7	0.8	0.6	0.4	0.2	0	0

<ファジィルールの重要度の算出>

ファジィルールの重要度がすべて等しいときにはファジィ決定は(2.3)式により定義される. ファジィルールの重要度が各々異なった場合のファジィ決定は(2.5)式で定義される.

$$D(x) = \min(\mu_1^{\alpha_1}(x), \mu_2^{\alpha_2}(x), \mu_3^{\alpha_3}(x), \dots, \mu_n^{\alpha_n}(x)) \quad (2.5)$$

ここで, α は各々のファジィルールの重み係数である. この重み係数 α は, (2.6)式に示すように, ファジィルールの重要度 w から決定することが出来る.

$$\alpha_i = nw_i \quad (2.6)$$

ここで、重要度 w のについて考える。重要度 w の算出には、以下に示す一対比較法を用いる。比較するファジィルールが n 個あるとする。まず、「非常に」や「やや」などといった自然な言語でそれぞれのルールに対し、一対比較を行う。そして、Table 2.3 のように、応答に応じた数値に割り当てる。その値を用いて、 a_{ij} を (i,j) 成分とする一対比較行列 $A=[a_{ij}]$ を作成する。ここで、 $i=1,2,\dots,n$, $j=1,2,\dots,n$, $a_{ji}=1/a_{ij}$ であり、対角要素 $a_{ii}=1$ である。

一対比較行列 A の最大固有値 λ_{\max} に対する固有値ベクトル W が重要度となる。

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (2.7)$$

$$W = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_n] \quad (2.8)$$

ただし、 $w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n = 1$ である。

表2.3 一対比較表

Table 2.3 Table of Paired Comparison

comparison factor from i to j	a_{ij}
as important as	1
a little important	3
important	5
quite important	7
very important	9
interpolated value	2,4,6,8

2.5 ロボットの制御

本研究では Fig.2.1 に示す二輪の車輪を有する移動ロボットを用いる。移動ロボットのモデル図を Fig.2.9 に示す。この移動ロボットは車輪の速度差により直進・カーブ・その場旋回をする独立二動輪操舵方式(Power Wheeled Steering(PWS)方式)を用い走行制御を行う。また、それぞれの車輪は PI コントローラにフィードフォワード補償器を付加した PWS コントローラ[8]により速度制御を行う。

2.6.1 で軌道計画により生成された経路のデータから、車輪の角速度指令を生成する方法について説明する。2.6.2 で車輪の速度制御について説明する。

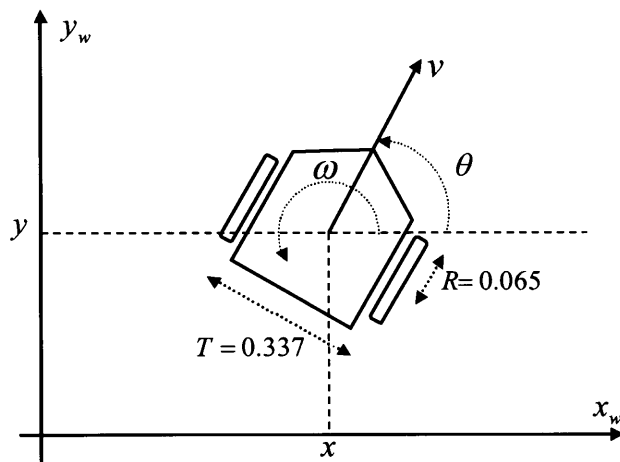


図2.9 ロボットのモデル図

Fig. 2.9 Model of Robot

2.5.1 車輪の角速度指令の生成

ここでは、軌道計画により生成された経路データから両車輪の角速度指令の生成法について説明する。まず、Fig.2.9 に示されるモデル図に対する運動学、逆運動学を(2.9), (2.10)式に示す。ただし、 ω_r , ω_l は車輪の角速度であり、 ω_r^{ref} , ω_l^{ref} は車輪の角速度指令である。

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & \frac{R}{2} \\ \frac{R}{T} & -\frac{R}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_r^{ref} \\ \omega_l^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & \frac{T}{2R} \\ \frac{1}{R} & -\frac{T}{2R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^{ref} \\ \omega^{ref} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

車輪の角速度指令は(2.10)式により生成する。ここでロボットの直進速度 v^{ref} 、回転角速度 ω^{ref} は軌道計画により生成された経路データから算出する。経路データは位置・姿勢情報を含む点列データで与えられる。それぞれの点列間に対する直進速度 v^{ref} 、回転角速度 ω^{ref} を(2.11), (2.12)式に示す。ここで、 (x_k, y_k, θ_k) は k 点目の位置・姿勢の経路データである。また、 t は点列間を走行するのに要する時間である。本研究では、全ての点列間において等距離となるように経路生成するので直進速度 v^{ref} は一定速度となる。

$$v^{ref} = \frac{\sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2}}{t} \quad (2.11)$$

$$\omega^{ref} = \frac{\theta_{k+1} - \theta_k}{t} \quad (2.12)$$

この角速度指令に各車輪の角速度応答が追従すれば、軌道計画により生成された経路に追従することが出来る。次に、角速度指令に車輪の角速度応答を追従させるための車輪の制御法について説明する。

2.5.2 車輪の速度制御

本研究で用いるロボットの、運動方程式、駆動系の方程式から導かれる動特性を(2.13), (2.14)式に示す。各パラメータは付録に記載する。

$$\tau_r = A \frac{d\omega_r}{dt} + C \frac{d\omega_l}{dt} + E\omega_r \quad (2.13)$$

$$\tau_l = B \frac{d\omega_l}{dt} + D \frac{d\omega_r}{dt} + F\omega_l \quad (2.14)$$

ここで、各係数は(2.15)式に示す。

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{\gamma_r} \left\{ \gamma_r^2 J_{mr} + J_r + R^2 \left(\frac{M}{4} + \frac{J}{T^2} \right) \right\} \\ B &= \frac{1}{\gamma_l} \left\{ \gamma_l^2 J_{ml} + J_l + R^2 \left(\frac{M}{4} + \frac{J}{T^2} \right) \right\} \\ C &= \frac{1}{\gamma_r} \left\{ R^2 \left(\frac{M}{4} - \frac{J}{L^2} \right) \right\} \\ D &= \frac{1}{\gamma_l} \left\{ R^2 \left(\frac{M}{4} - \frac{J}{L^2} \right) \right\} \\ E &= \frac{1}{\gamma_r} \delta_r \\ F &= \frac{1}{\gamma_l} \delta_l \end{aligned} \quad (2.15)$$

(2.13), (2.14), (2.15)からロボットの動特性には、ロボットの質量や慣性モーメントなどの影響による動輪間干渉作用がある。左右のモータにトルクを発生させたとき、それぞれの角速度が他の車輪に影響を及ぼす。この動特性の逆の特性を

持つフィードフォワード補償器(2.16)式を構成する。これにより、両車輪の相互間干渉を打ち消す。

$$\begin{aligned} \tau_r^{ref} &= A \frac{d\omega_r^{ref}}{dt} + C \frac{d\omega_l^{ref}}{dt} + E\omega_r^{ref} \\ \tau_l^{ref} &= B \frac{d\omega_l^{ref}}{dt} + D \frac{d\omega_r^{ref}}{dt} + F\omega_l^{ref} \end{aligned} \tag{2.16}$$

車輪の制御には、PI コントローラに上に記したフィードフォワード補償器を付加した PWS コントローラを用いる。構成した PWS コントローラを Fig.2.10 に示す。

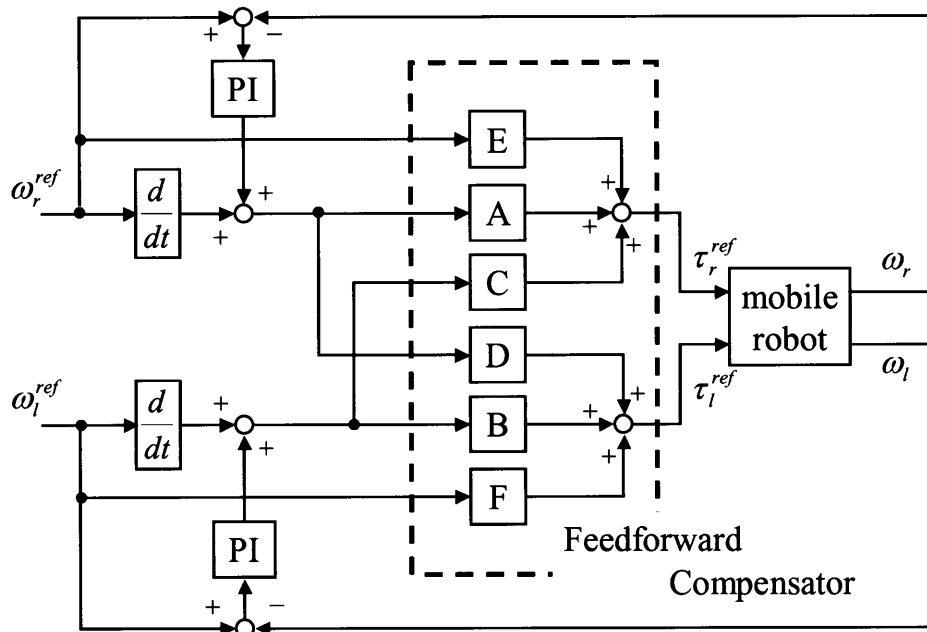


図2.10 PWS コントローラ
Fig. 2.10 PWS Controller

この PWS コントローラにより車輪の速度制御を行った結果を Fig2.11 に示す. 速度指令は 2[sec]後に 4[rad/sec], 8[sec]から減速して 10[sec]で速度が 0[rad/sec]になるような台形速度指令とした.

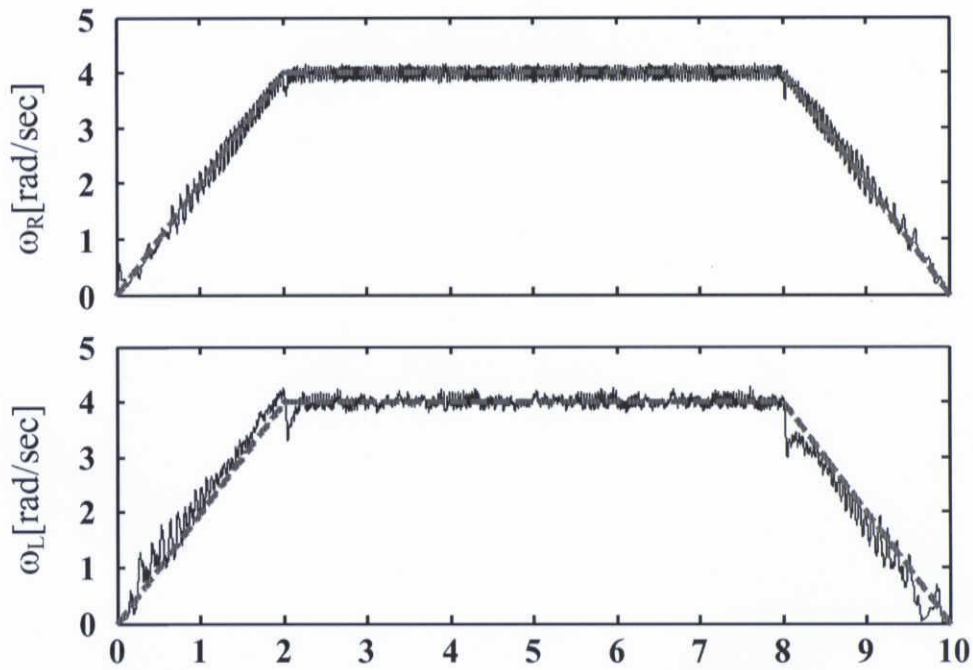


図2.11 PWS コントローラによる車輪の速度制御
(破線：指令，実線：応答)

Fig. 2.11 Angular Velocity Control of Wheels with PWS Controller
(dashed line : reference , solid line : response)

第3章

ファジィ意思決定を用いた軌道計画

本章では軌道計画について述べる。提案手法であるファジィ意思決定による小目標点・経由点の決定法について説明する。また、ロボットの初期位置，決定された小目標点・経由点との間を clothoid 曲線と直線軌道により補間する経路生成について説明する。

3.1 軌道計画の流れ

軌道計画では，移動ロボットを目標位置まで到達させることは重要である。しかし，目標位置まで到達させることだけを考慮した軌道計画では人間や周囲の環境に衝突して危害を加えることも考えられる。したがって，移動ロボットを目標位置に到達させるためには周囲に危害を加えないように安全性を考慮することは非常に重要なことである。また，出来るだけ短距離で走行できることが望ましい。そこで，本研究では，これらのことを考慮した軌道計画法について提案する。

まず，本提案手法であるファジィ意思決定による小目標点，経由点の決定を行う。その後，これらの点を補間するように clothoid 曲線と直線軌道を組み合わせた経路生成を行う。

Fig3.1 に階層的に構築した軌道計画のアルゴリズムを示す. このように階層的に構築することにより, 予期せぬ状況, 例えば生成した経路上に障害物が置かれるなどした場合, 上位層である経路点決定, 小目標点決定に戻ることで動的環境下に対しても走行可能となる. Fig3.1 に軌道計画のアルゴリズムについて示す.

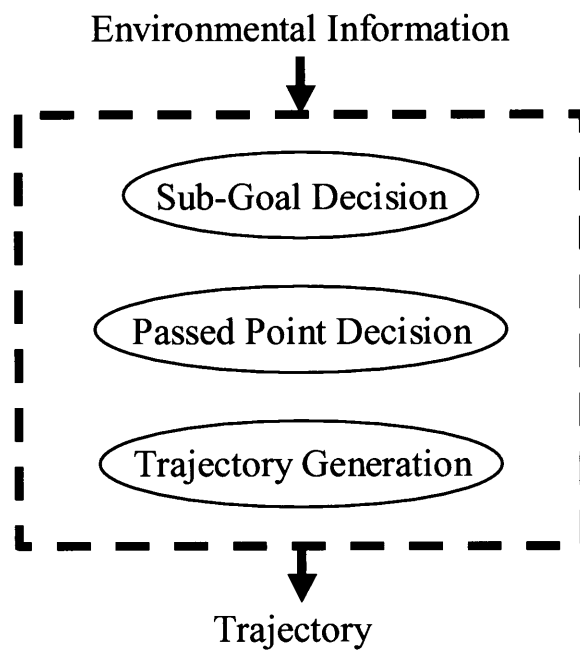


図3.1 軌道計画のアルゴリズム
Fig. 3.1 Path Planning Algorithm

3.2 小目標点決定

軌道計画の第1ステップとして、小目標点決定を行う。小目標点決定は、環境認識により複数検出された開口部の中からどの開口部の方向に進んでいくのかを決定する開口部決定を行い、決定された開口部の何処を通るのかを決定する位置決定を行う。この開口部決定、位置決定を合わせて小目標点決定と呼ぶ。これらは、安全性を考慮し、また、一定速度で走行させることを前提としているので、出来るだけ短距離で走行できるということを考慮して決定する。以下に開口部決定、位置決定について説明する。

3.2.1 開口部決定

上にも述べたように、環境認識により検出された複数の開口部の中からどの開口部の方向に進んでいくのかについて決定するのがこの方向決定である。方向決定にはファジィ意思決定を用いる。そのときのファジィルールは、

- (1) 安全性のルール
- (2) 最短距離のルール
- (3) 姿勢のルール

とした。それぞれのルールについて以下に説明する。

(1) 安全性のルール

安全性はロボットのスピードや障害物までの距離により決まる。例えば、走行スピードが速ければ、遅いときよりもより安全性を考慮しなくてはならない。しかし、本研究では、移動ロボットの走行速度が一定になるように制御する。したがって、障害物までの距離を考慮することで安全性について考える。

移動ロボットは開口部の間を通り抜け走行する。したがって、通り抜ける開口部が広い方が安全であり望ましい。そこで、開口部の幅を評価することで安全性を考慮するのがこのルールである。このルールの概念図を Fig.3.2 に、評価式を(3.1)式に示す。ただし、 a_1 : 安全余裕、 b_1 : 最大安全余裕である。

$$f(d_{width}) = \begin{cases} 0 & (d_{width} < a_1) \\ \frac{d_{width} - a_1}{b_1 - a_1} & (a_1 \leq d_{width} \leq b_1) \\ 1 & (d_{width} \geq b_1) \end{cases} \quad (3.1)$$

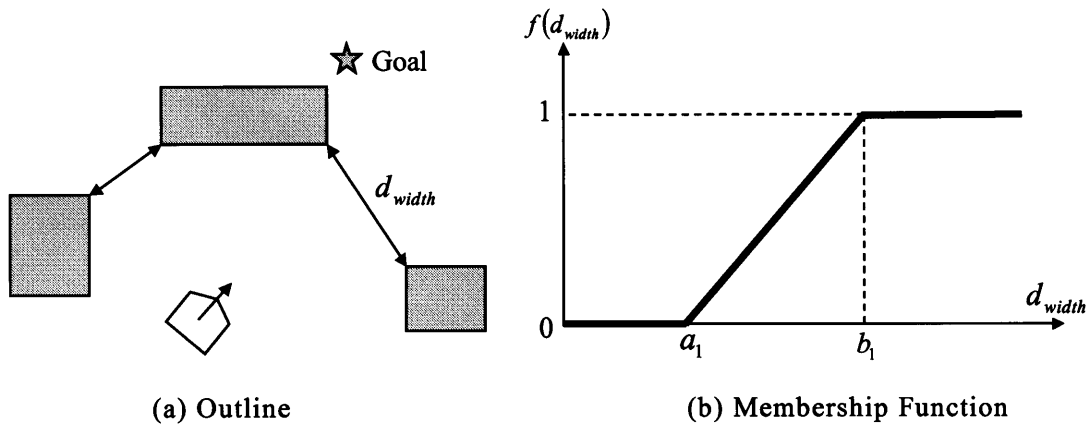


図3.2 安全性のルール(方向決定)
Fig. 3.2 Safety Rule (Direction Decision)

(2) 最短距離のルール

移動ロボットの軌道計画としてより良いとされるのが、無駄時間がなく目標位置に到達するような計画である。本研究では移動ロボットの走行速度を一定に制御することより、無駄時間を短くするためには出来るだけ短距離な軌道計画が望ましい。そこで、出来るだけ短距離で走行できるであろう方向を評価するのがこのルールである。このルールの概念図を Fig.3.3 に、評価式を(3.2)式に示す。

$$f(A,B,C) = \frac{C}{A+B} \quad (3.2)$$

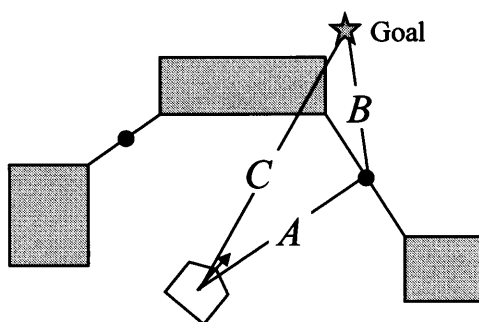


図3.3 最短距離のルール(方向決定)

Fig. 3.3 The Shortest Distance Rule (Direction Decision)

(3) 姿勢のルール

本研究で用いる移動ロボットは2輪の速度差により直進・カーブ・その場旋回を行い走行する。しかし、移動ロボットは真横に走行するなど出来ない構造となっている。したがって、安全性・最短距離のルールのみにより方向決定を行うと、走行できない方向を決定してしまう可能性がある。そこで、移動ロボットの姿勢を考慮することは必要である。したがって、ロボットの姿勢がどれだけ開口部の方向を向いているのかを評価するのがこのルールである。このルールの概念図をFig.3.4に、評価式を(3.3)式に示す。

$$f(\theta_{posture}) = \begin{cases} -\frac{1}{180}\theta_{posture} + 1 & (0 \leq \theta_{posture} \leq 180) \\ \frac{1}{180}\theta_{posture} - 1 & (180 \leq \theta_{posture} \leq 360) \end{cases} \quad (3.3)$$

ただし、 $\theta_{posture} = |\theta_1 - \theta_2|$ とおく。

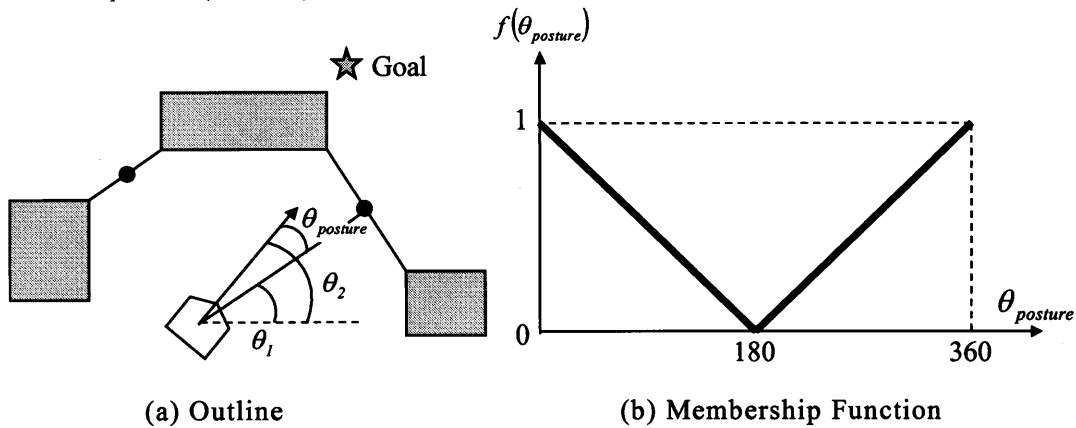


図3.4 姿勢のルール(方向決定)
Fig. 3.4 Posture Rule (Direction Decision)

このようにして、各開口部に対して得られた評価値から、min-max法を用いることで方向決定を行う。

3.2.2 位置決定

開口部決定によって決定された開口部に対して，その開口部の何処を通れば安全で，短距離に走行できるのかを決定する．位置決定にはファジィ意思決定を用いる．そのときのファジィルールは，

- (1) 安全性のルール
- (2) 最短距離のルール

とした．それぞれのルールを以下に説明する．

(1) 安全性のルール

移動ロボットは目標位置まで安全に走行することが求められる．安全に走行するためには障害物までの距離が出来るだけ遠いことが望ましい．したがって，障害物までの距離を評価するのがこのルールである．このルールの概念図を Fig3.5 に，評価式を(3.4)式に示す．ただし， a_2 ：安全余裕， b_2 ：最大安全余裕であり，

$$f(w_p) = \begin{cases} 0 & (w_p < a_2) \\ \frac{w_p - a_2}{b_2 - a_2} & (a_2 \leq w_p \leq b_2) \\ 1 & (w_p > b_2) \end{cases} \quad (3.4)$$

ただし， $w_p = \begin{cases} w_1 (w_1 \leq w_2) \\ w_2 (w_2 < w_1) \end{cases}$ である．

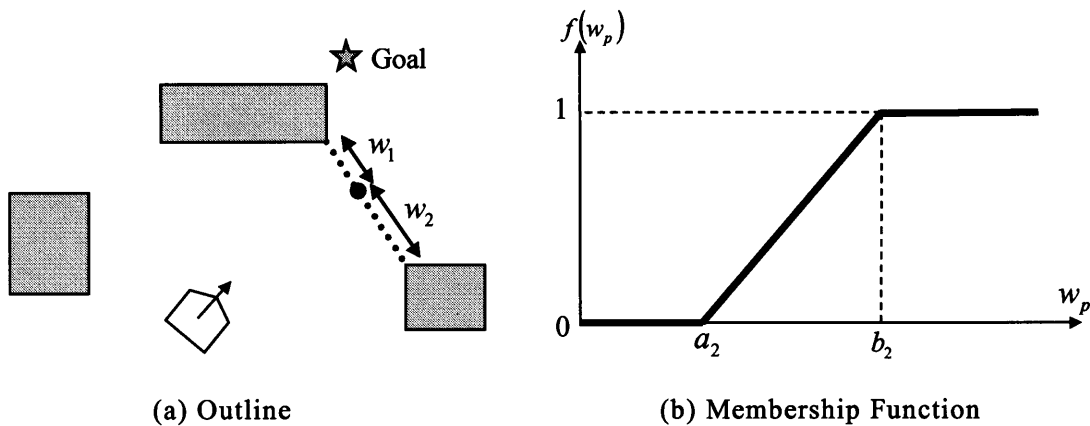


図3.5 安全性のルール(位置決定)
Fig. 3.5 Safety Rule (Sub-Goal Decision)

(2) 最短距離のルール

移動ロボットが軌道計画を行う際、無駄時間が短いことを考慮した軌道が望ましい。つまり、出来るだけ最短距離に走行できる軌道が良い。したがって、目標位置までの距離を評価するのがこのルールである。このルールの概念図を Fig.3.6 に、評価式を(3.5)式に示す。

$$f(A_p, B_p, C_p) = \frac{C_p}{A_p + B_p} \quad (3.5)$$

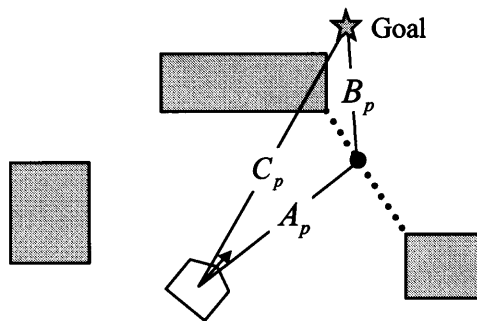


図3.6 最短距離のルール(位置決定)

Fig. 3.6 The Shortest Distance Rule (Position Decision)

このようにして、決定された開口部中の各小目標候補点に対して算出した評価値から、min-max法を用いて位置決定を行う。決定された位置を小目標点とする。

3.3 経路点決定

環境認識で得られた複数の開口部の中からどの開口部の方向を通るのか、また、その開口部中のどこの位置を通るかについて安全性や目標位置までの距離を考慮して小目標点を決定した。しかし、これは決定された小目標点自体がより評価が高いとされるだけである。したがって、移動ロボットの現在位置と小目標点の間についてはどのように走行すると安全であり、短距離で走行可能かについては述べられていない。つまり、その間の走行によっては周囲の環境に衝突する恐れも考えられる。そこで、ロボットの現在位置と小目標点の間について、安全性や小目標方向に向かって行くことを考慮した経路点の決定を行う。これにより、この間についても安全性などが考慮された軌道計画を行うことが出来る。以下に経路点決定について説明する。

3.3.1 経路点の決定範囲

ここでは経路点を決定する範囲(経路点候補)について説明する。経路点候補はFig.3.7に示すように、移動ロボットの現在位置からある半径を持った円周上に離散的に経路点候補を作る。その経路点候補から3.3.2で説明する決定法により経路点を決定する。その後、決定された経路点からある半径を持つ円周上に2つ目の経路点候補を作る。その経路点候補から同様に経路点を決定する。この操作を経路点候補を作る円周内に小目標点が存在するまで経路点を決定する。

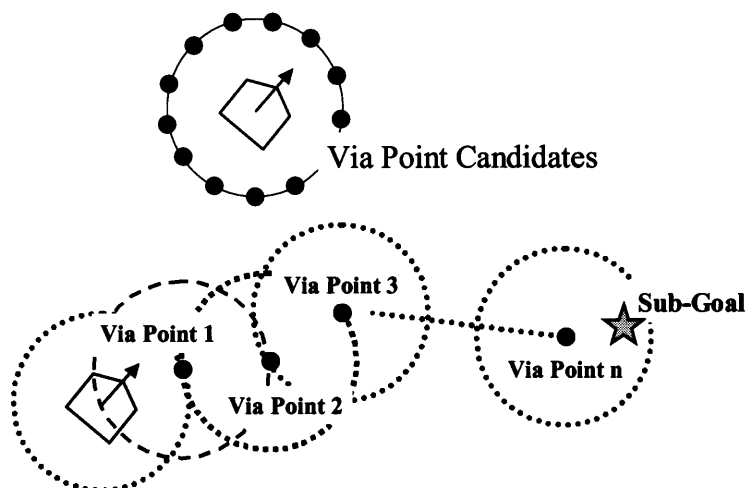


図3.7 経路点の決定範囲(経路点候補)

Fig. 3.7 Via Point Candidates

ここで、経路点候補を作る円の半径を適切に決定する必要がある。もし、円の半径を小さくした場合には、数多くの経路点が決定されることになる。したがって、より安全性を考慮した軌道計画を行うことが出来る。しかしながら、数多くの経路点を決定することは計算コストが高くなる。軌道計画を更新しながら走行するためには、計算コストを小さくして出来るだけリアルタイムで軌道計画を行える必要がある。したがって、円の半径を小さくしすぎることは良くない。そこで、計算コストを考慮し、円の半径を大きくしすぎると、円周内に障害物が存在することになり、決定される経路点が安全であっても、円周内を走行中に障害物に接触する恐れが出てくる。したがって、円周内の最低限の安全性を確保し、出来るだけ円の半径を大きくすることが望ましい。そこで、Fig.3.8 に示すように、移動ロボットの位置もしくは経路点の位置から一番近い障害物までの距離 D_{min} を利用して、円の半径を(3.6)式により決定する。ただし、右辺第2項は安全性に余裕を持たせるためのものである。

$$r = D_{min} - \frac{T}{2} \quad (3.6)$$

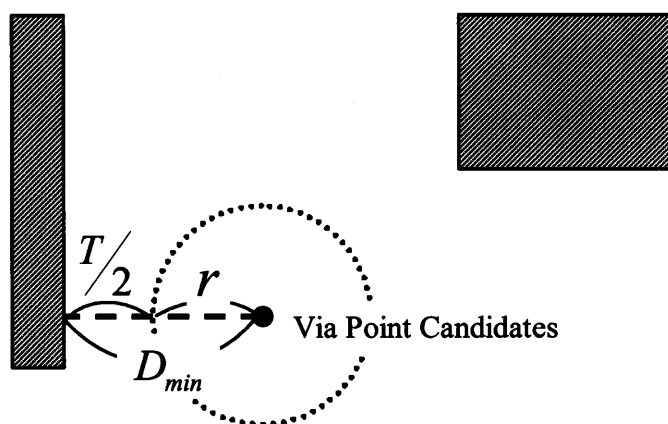


図3.8 円の半径の決定

Fig. 3.8 Circle Radius Decision

3.3.2 経路点決定のためのファジィルール

ここでは、3.4.1 で説明した経路点候補の中から経路点を決定する方法について説明する。決定する際、何度も述べているように移動ロボットは人間や周囲の環境に危害を加えることがあってはならない。また、短距離で走行することが望まれる。そこで、ファジィ意思決定によりこれらのことを考慮した経路点の決定を行う。そのときのファジィルールは、

- (1) 安全性のルール
- (2) 目標位置・小目標点のルール

とした。それぞれのルールを以下に説明する。

(1) 安全性のルール

安全性を考慮するために、障害物からの距離ができるだけ離れていることが望ましい。各々の経路点候補に対し、一番近い障害物までの距離 d_1 が大きい候補点の方がより安全である。したがって、障害物からの距離 d_1 を評価するのがこのルールである。このルールの概念図を Fig.3.9 に、評価式を(3.7)に示す。

$$f(d_1) = \begin{cases} 0 & (d_1 < T/2) \\ \frac{2d_1 - T}{T} & (T/2 \leq d_1 \leq T) \\ 1 & (d_1 > T) \end{cases} \quad (3.7)$$

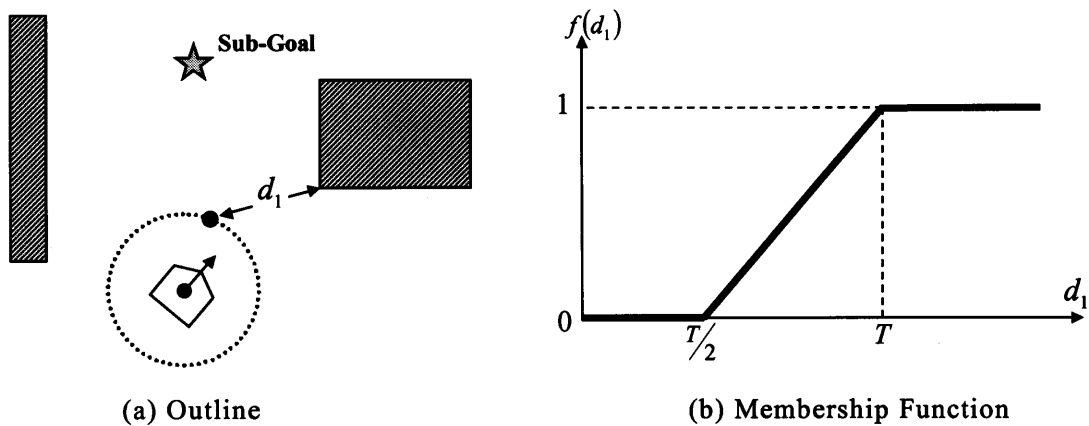


図3.9 安全性のルール(経路点決定)
Fig. 3.9 Safety Rule (Via Point Decision)

(2) 目標位置・小目標点のルール

移動ロボットは決定された小目標点もしくは目標位置の方向に向かっていかなければならない。したがって、小目標点，目標位置までの距離を評価するのがこのルールである。このルールの概念図を Fig3.10 に，評価式を(3.8)に示す。

$$f(d_2) = \begin{cases} 0 & (d_2 > D) \\ \frac{D-d_2}{D-d'} & (d_2 \leq D) \end{cases} \quad (3.8)$$

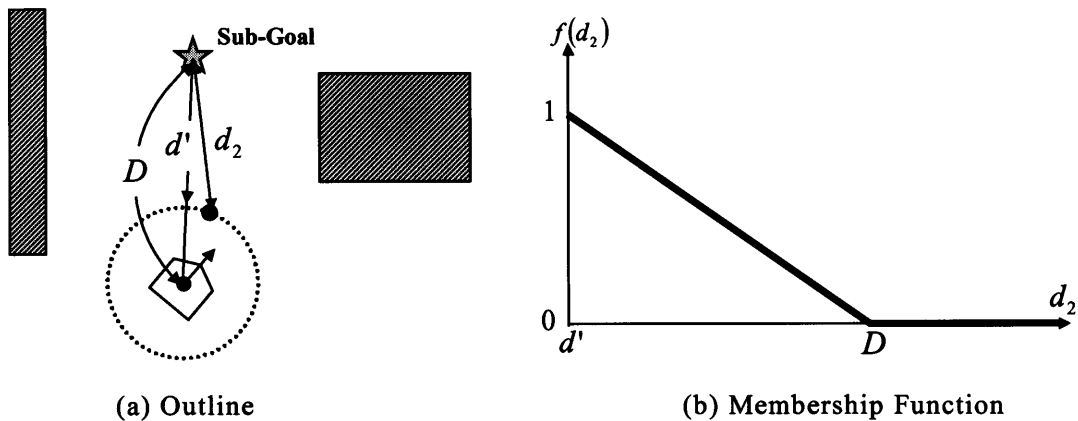


図3.10 目標位置・小目標点のルール

Fig. 3.10 Goal Position, Sub-Goal Rule (Via Point Decision)

このようにして各経路点候補に対して算出した評価値に重みを乗じ，その評価値に対して，min-max法を用い経路点の決定を行う。

ここで，重みをどのようにするのかということが重要となってくる。3.3.3で2つのファジールールの重みについて説明する。

3.3.3 重みの決定

2つのファジィルールの重み決定について説明する。重みの決定には、以下のことを考慮して決定する。

小目標点から離れた位置では、人間や周囲の環境に危害を加えないことを最重視して安全性のルールの重みを高くする。

小目標点から近い位置では、小目標点の方向に向かっていくことをより重視して目標位置・小目標点のルールの重みを高くする。

その中間の位置では、安全性のルール、目標位置・小目標点のルールは同等の重みにする。

このように、Fig.3.11 に示す小目標点までの距離 d_3 により重みを決定する。また、重みの決定には一対比較法[付録 B]を用いる。

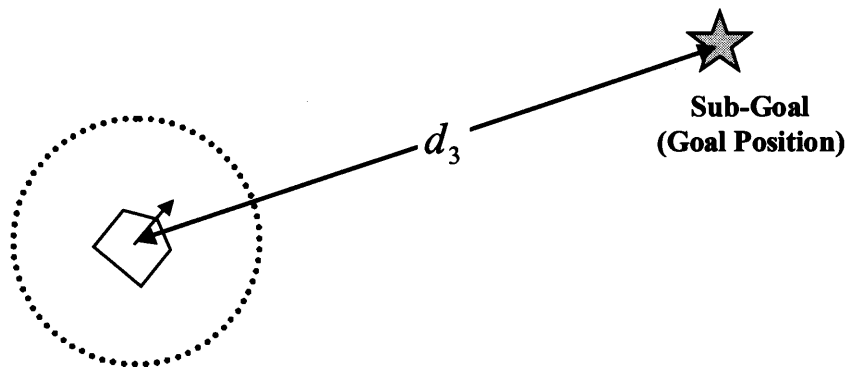


図3.11 重み決定のための小目標点(目標位置)までの距離 d_3

Fig. 3.11 Distance d_3 to Sub-Goal (Goal Position) for Weight Decision

距離 d_3 に対する一対比較を以下のように設定した。決定された重みも合わせて示しておく。

(i) $d_3 < 1.5[m]$ のとき

目標位置・小目標点のルールは安全性のルールよりやや重要とする。

(重み)目標位置・小目標点のルール：1.3333, 安全性のルール：0.6667

(ii) $1.5 < d_3 < 2.0[m]$ のとき

目標位置・小目標点のルールと安全性のルールは同じように重要とする。

(重み)目標位置・小目標点のルール：1.0, 安全性のルール：1.0

(iii) $d_3 > 2.0[m]$ のとき

安全性のルールは目標位置・小目標点のルールより重要とする。

(重み)目標位置・小目標点のルール：0.3333, 安全性のルール：1.6667

この重みを用いて経路点の決定を行ったとき、重みを考慮せず(同等の重み)に経路点の決定を行ったときの経路点決定のシミュレーションを行った。設定した環境は Fig.3.12 で行った。

重みを考慮せずに経路点の決定を行った結果を Fig.3.13 に示し、また、重みを考慮して経路点決定を行った結果を Fig.3.14 に示す。

重みを考慮せずに経路点を決定した Fig.3.13 では、目標位置が境界面や障害物などの付近に設定されたとき、目標位置付近で安全性の評価値が非常に小さくなり不自然な方向に経路点が決定されることがある。Fig.3.13 では経路点 4 の後から不自然な経路点が決定されている。そこで、重みを考慮した経路点決定(Fig.3.14)では経路点 4 まではほぼ同じ位置に決定されているが、経路点 5 では目標位置・小目標点のルールがより重視されていることにより自然な位置に経路点が決定される結果となった。このことから、本手法による距離に応じた重みを考慮して経路点決定を行う有効性を示した。

以下、重みを考慮した経路点決定に対してのみ結果を示すものとする。

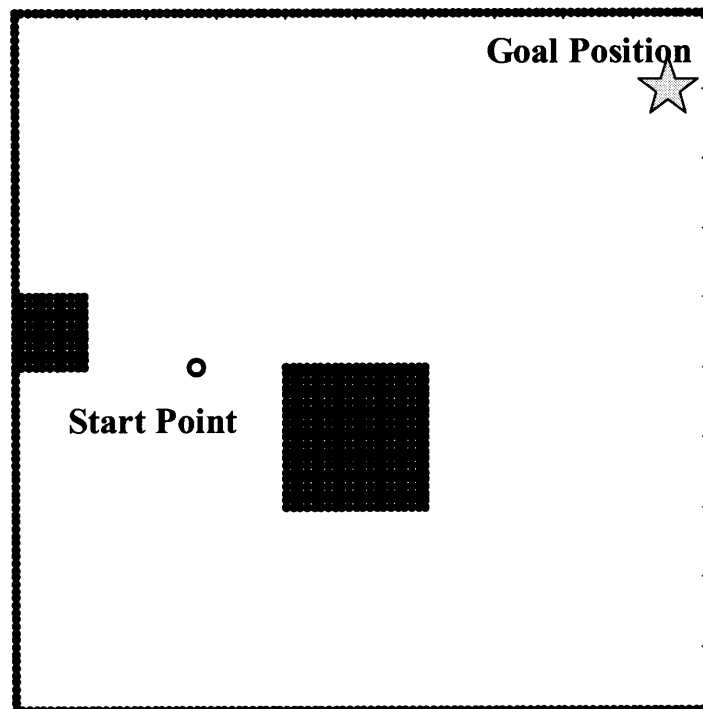


図3.12 設定した環境

Fig. 3.12 Actual Environment

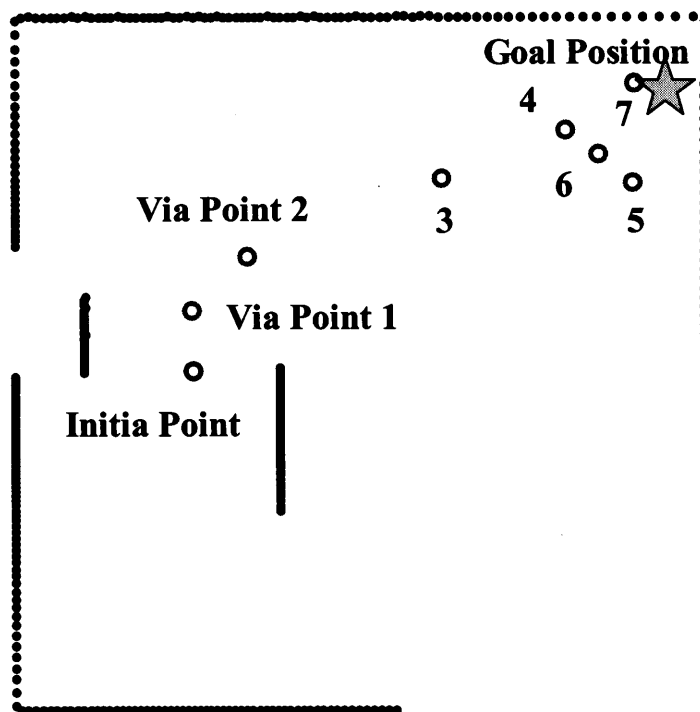


図3.13 経路点決定(重みなし)

Fig. 3.13 Via Points Decision (without weight)

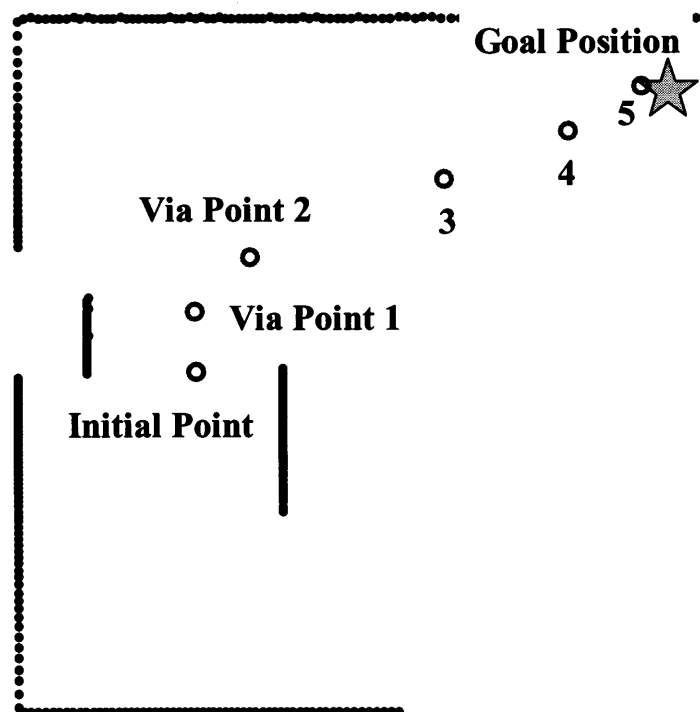


図3.14 経路点決定(重みあり)

Fig. 3.14 Via Points Decision (with weight)

3.4 経路生成

次に、3.2, 3.3 で決定された小目標点・経由点間を補間するために、滑らかな経路を生成できる clothoid 曲線と直線軌道を組み合わせた経路生成[12][13]を行う。

clothoid 曲線は緩和曲線の 1 つで、高速道路の曲線部分などに適応されており、遠心力の急激な変化が発生しないことで知られている。急激な遠心力変化が発生しないので、移動ロボットの転倒やこれに伴う搭載機器の破損などの原因を防ぐことが出来る。また、駆動系への速度指令が緩やかな変化となるために生成した経路への追従がより可能となる。

3.4.1 clothoid 曲線

clothoid 曲線は、緩和曲線の 1 つである。曲率半径 R_C を走行距離 L_C に反比例させた曲線で、次式で示される。ただし、 A_C はクロソイドパラメータである。

$$R_C \times L_C = A_C \quad (3.9)$$

Fig3.15 に clothoid 曲線と L_C , R_C の関係を示す。原点より点 P までの曲線を L_C 、点 P における曲率半径を R_C 、その接線角を τ_C とすると、(3.9)式よりそれぞれのパラメータは(3.10)、(3.11)、(3.12)式で表される。

$$R_C = \frac{A_C}{\sqrt{2\tau_C}} \quad (3.10)$$

$$L_C = A_C \sqrt{2\tau_C} \quad (3.11)$$

$$\tau_C = \frac{L_C}{2R_C} \quad (3.12)$$

これらのパラメータを使って clothoid 曲線を生成する. Fig.3.15 の原点から点 P まで clothoid 曲線を生成する式を(3.13)に示す.

$$x_c = \frac{2A_c}{\sqrt{2}} \times \sqrt{\tau_c} \times \left(1 - \frac{\tau_c^2}{10} + \frac{\tau_c^4}{216} - \frac{\tau_c^6}{9360} + \frac{\tau_c^8}{685440} \dots \right)$$

$$y_c = \frac{A_c}{\sqrt{2}} \times \frac{2}{3} \times \tau_c \times \sqrt{\tau_c} \times \left(1 - \frac{\tau_c^2}{14} + \frac{\tau_c^4}{440} - \frac{\tau_c^6}{25200} + \frac{\tau_c^8}{2298240} \dots \right) \quad (3.13)$$

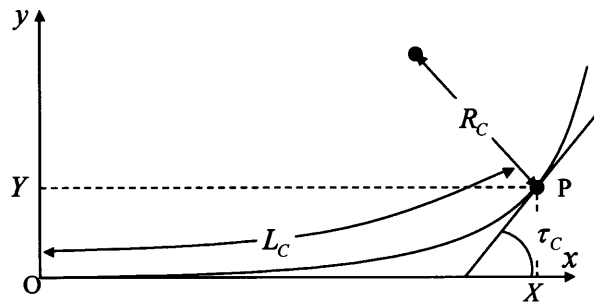


図3.15 clothoid 曲線におけるパラメータ
Fig. 3.15 Parameter of Clothoid Curve

ここで, クロソイドパラメータ A_c を求める上で必要なパラメータである原点から点 P までのクロソイド曲線長 L_c , 点 P での曲率半径 R_c の求め方について説明する. 3 点 P_0, P_1, P_2 間をクロソイド曲線により経路生成することを考える. モデル化した clothoid 曲線を Fig.3.16 に示す. まず, P_0, P_1 間の距離を 1 として考える. 直線 P_0P_1 と直線 P_1P_2 とのなす角 θ_c と L_c, R_c のそれぞれの特性[12]から P_0, P_1 間の距離が 1 であるときの L'_c, R'_c が(3.14), (3.15)式により求まる. それぞれに実際の P_0, P_1 間の距離 d_c を乗ずることにより L_c, R_c を算出する(それぞれ(3.16)式, (3.17)式).

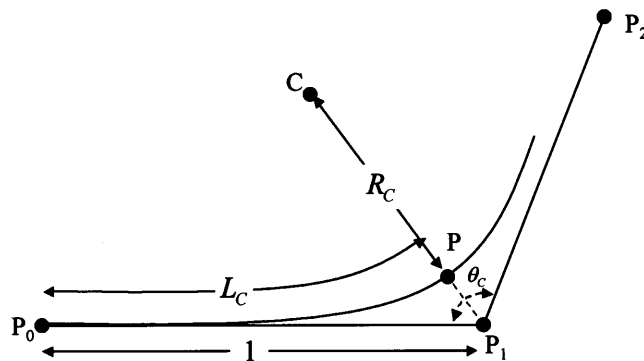


図3.16 clothoid 曲線のモデル化
Fig. 3.16 Clothoid Curve Model

$$L'_C = 0.0463\theta^3 - 0.3548\theta^2 + 0.9841\theta \quad (3.14)$$

$$R'_C = -0.0328\theta^2 + 0.2010\theta - 0.3 + \frac{0.96}{\pi - \theta} \quad (3.15)$$

$$L_C = d_C L'_C \quad (3.16)$$

$$R_C = d_C R'_C \quad (3.17)$$

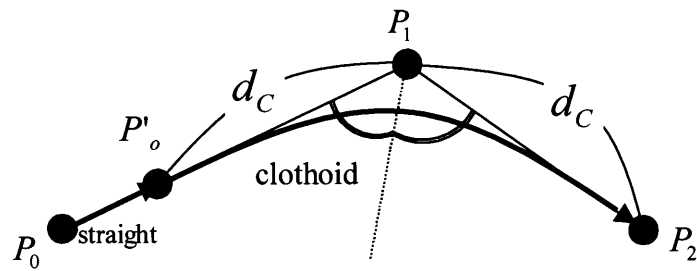
(3.16), (3.17)式から求めた L_C , R_C を用いて(3.9)~(3.13)式より clothoid 曲線を生成する.

次に, 本研究で用いた clothoid 曲線の生成法の詳細を説明する. Fig3.17 に示すように移動ロボットの現在位置での姿勢が次の点(経由点)の方向を向いている場合と, 次の点の方向を向いていない場合の2通りの経路生成法に分ける.

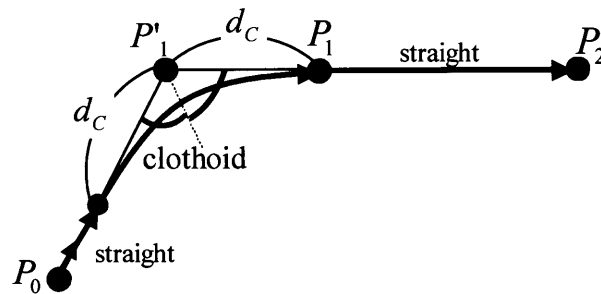
(a)に示すように, 移動ロボットの姿勢が P_1 の方向を向いている場合, P_0 , P_1 , P_2 を用いて部分的に経路を生成する. P_0 , P_1 , P_2 のなす角の二等分線で線対称, かつ, P_0 もしくは P_2 に接するような軌道を clothoid 曲線により描く. Fig3.17(a)では, P_0P_1 間の距離に対して, P_1P_2 間の距離が長いため, 角の二等分線に対して P_2 の線対称の仮想点 P'_0 を設け, $P_0P'_0$ 間を直線で描く. その後, P'_0 から角の二等分線上までの clothoid 曲線を描く. 次に, 描かれた clothoid 曲線を角の二等分線で線対称にする. このようにして, P_2 までの経路生成を行う.

(b)に示すように, 移動ロボットの姿勢が P_1 の方向を向いていない場合, 移動ロボットの姿勢方向の直線と直線 P_1P_2 との交点に仮想点 P'_1 を設け, P_0 , P'_1 , P_1 に対して Fig3.17(a)と同様の方法により経路生成を行う. その後, P_1P_2 間では, P_1 における移動ロボットの方向は P_2 の方向を向くので, 直線により経路生成を行う.

しかし, Fig.3.18 のように仮想点 P'_1 が作られる場合において上の方法では clothoid 曲線が描くことが出来ない. そこで, ロボットの姿勢方向の直線と直線 P_1P_2 との交点に仮想点を設けるのではなく, Fig.3.19 に示すように P_1 から $\frac{r}{3}$ だけ離れた移動ロボットの姿勢方向の直線上に仮想点 P'_1 を設ける. この点は移動ロボットの位置から経由点 P_1 を決定するときに用いた円周内に決められるので安全性については考慮されている. ただし, r は経由点 P_1 を決定するときに用いた円の半径である. この P'_1 , P_0 , P_1 に対して Fig.3.17(a)と同様の方法により経路生成を行う.



(a) A Case of Posture of Robot faces to P_1 .



(b) A Case of Posture of Robot doesn't face to P_1 .

図3.17 clothoid 曲線による経路生成
Fig. 3.17 Trajectory Generation with Clothoid Curve

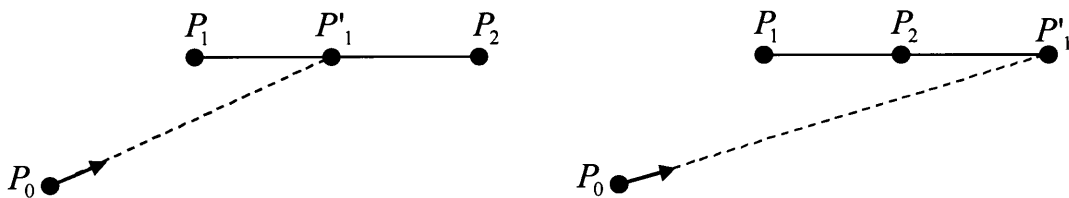


図3.18 clothoid 曲線を描けない場合
Fig. 3.18 Clothoid Curve can't be drawn.

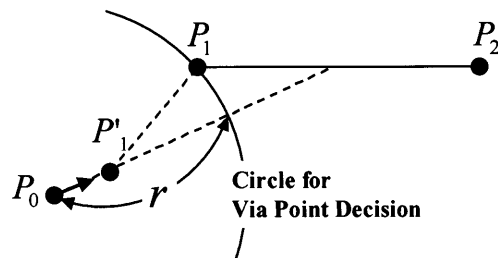


図3.19 Fig.3.18 に対する仮想点 P'_1 の設置
Fig. 3.19 Setting of Virtual Point P'_1 for Fig.3.18

第4章

実機による誘導実験

本手法の有効性を確かめるために、Fig.2.1 の移動ロボットを用い誘導実験を行った。環境認識、軌道計画、走行制御を走行中繰り返し行い目標位置まで誘導させた。このとき、環境認識を1[sec]周期、軌道計画を2[sec]周期で行った。

4.1 実験環境と条件

誘導実験を行ったときの環境を Fig.4.1 に示す。ただし、移動ロボットには環境情報は与えていない。したがって、ロボットにとって未知環境下での移動となる。

環境認識には、LRF センサにより障害物までの距離情報を計測するのだが、実験では LRF センサを模擬したプログラムにより距離計測を仮想的に行った。そのとき、1[deg]刻みで周囲 360[deg]の距離情報を取得できるものとし、センサノイズは考慮しないものとした。また、環境認識を行う周期は1[sec]とした。軌道計画は、2[sec]周期で計画を更新しながら走行させた。また、重みを考慮した経路点決定により軌道計画を行った。Table4.1 に実験条件をまとめた表を示す。

表4.1 実験条件

Table 4.1 Experimental Condition

Environment Recognition	LRF sensor	
	Range of Measurement [deg]	360
Distance that can be measured [m]	4.0	
	Measurement Period [sec]	1.0
Path Planning	Planning Period [sec]	2.0
Start Position ([m],[m],[deg])		(0.5,0.5,60)
Goal Position ([m],[m])		(1.75,2.0)

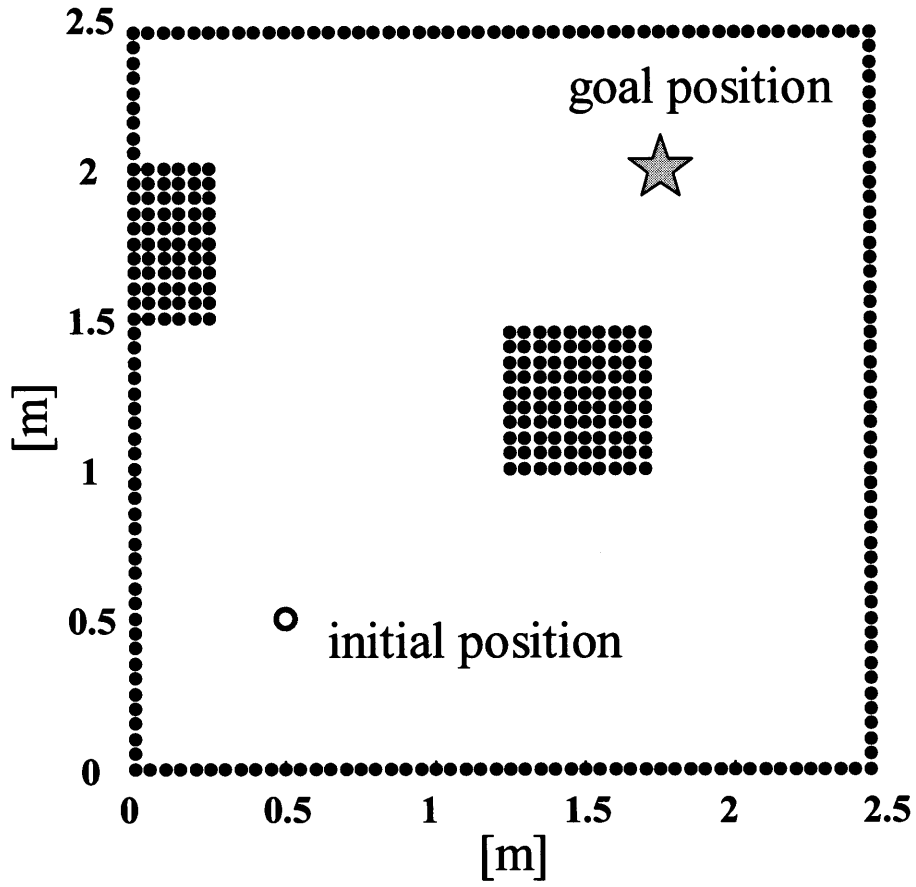


図4.1 実験環境

Fig. 4.1 Environment on Experiment

4.2 誘導実験結果および考察

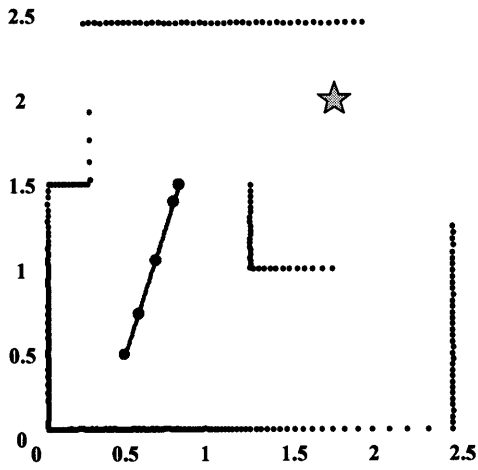
実機による誘導実験の結果を Fig.4.2, 4.3 に示す。

Fig.4.2 は走行しながら 2[sec]周期で軌道計画を更新している様子を示した図である。Fig.4.2(a)~(i)の軌道計画の結果より、安全性を考慮した軌道計画であることが確認できる。また、出来るだけ短距離で走行できる計画も行われていることが(d), (e)により確認できる。もし、安全性だけで軌道計画を行ったとすると、通路の真ん中を通る軌道計画が立てられることになるが、(d), (e)では真ん中ではなくやや目標位置方向を通る軌道計画が立てられている。

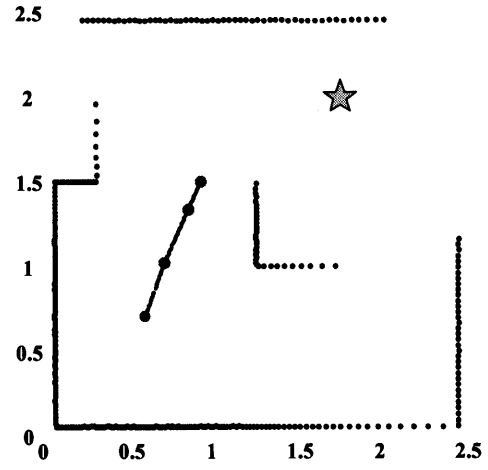
Fig.4.3 は誘導実験を行ったときの自律移動ロボットの走行軌道である。安全性を十分に考慮され、出来るだけ短距離に走行できていることが確認できる。

また、動的環境下において適応するためには、リアルタイムで軌道計画が行われることが必要となる。本提案手法での軌道計画に要する時間は数十[msec]であった。したがって、本提案手法はリアルタイムで軌道計画が行える。

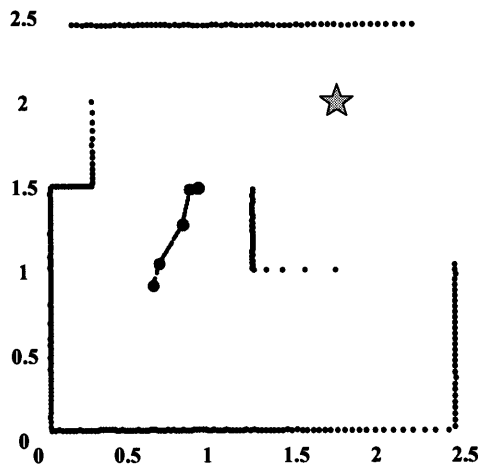
実験により、本提案手法での計画された軌道、軌道計画に要する時間の面での有効性を示した。



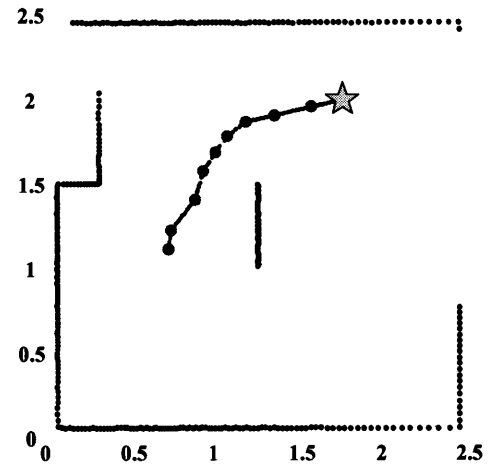
(a) first



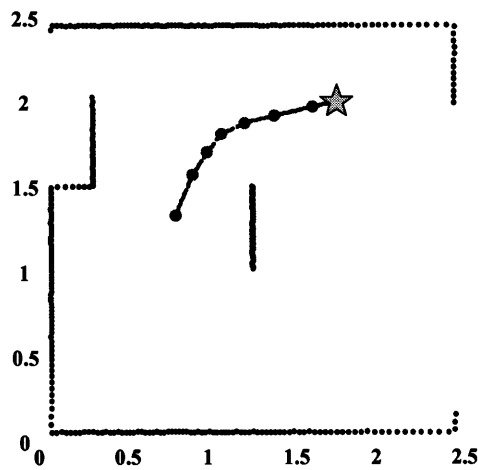
(b) second



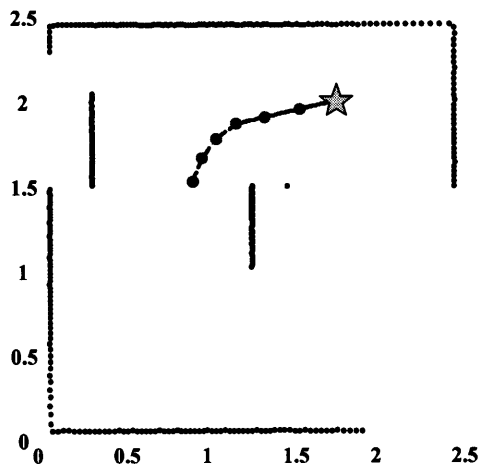
(c) third



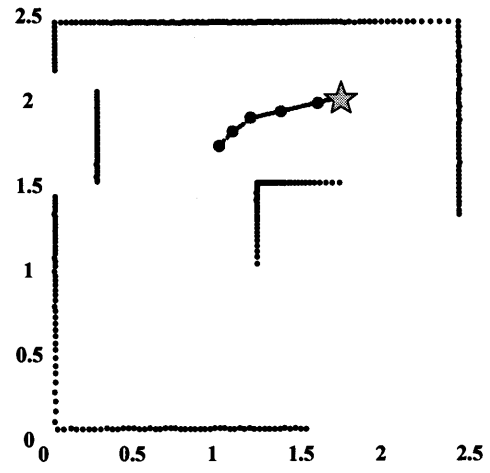
(d) fourth



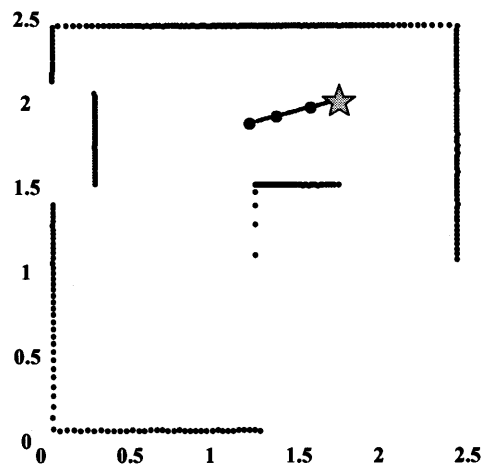
(e) fifth



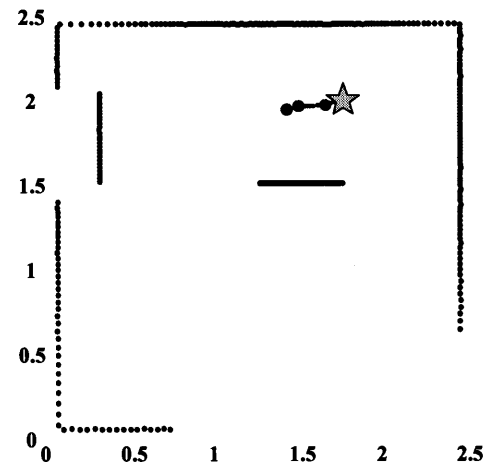
(f) sixth



(g) seventh



(h) eighth



(i) ninth

図4.2 軌道計画の更新の様子

Fig. 4.2 Transition of Update of Trajectory Planning

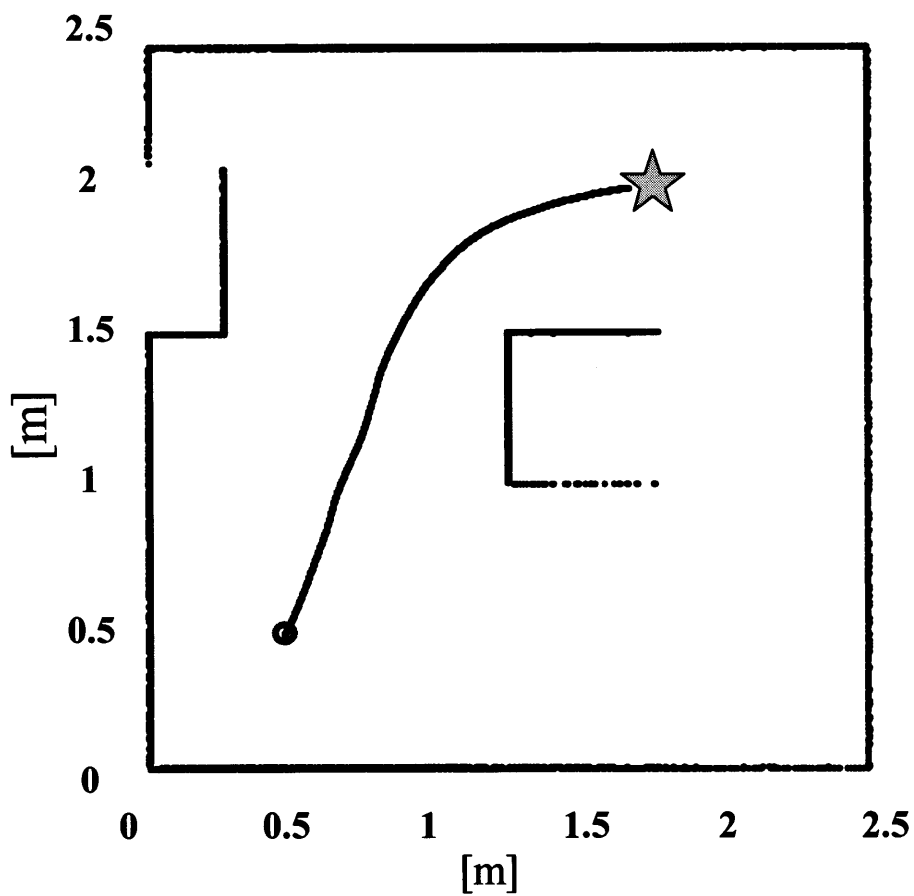


図4.3 走行軌道の結果

Fig. 4.3 Result of Running Trajectory

4.3 他の環境での誘導実験

Fig.4.4 に示す環境での誘導実験を行った。実験条件は Table.4.1 と同様とした。このときの結果を Fig.4.5, Fig.4.6 に示す。

Fig.4.5 は走行しながら 2[sec]周期で軌道計画を更新している様子を示した図である。Fig.4.5(a)~(h)の軌道計画の結果より、安全性を考慮した軌道計画であることが確認できる。また、Fig.4.5(d)では軌道計画を開始した最初の点において目標位置が見えているので目標位置までの軌道を計画している。また、Fig.4.5(e)では目標位置付近の障害物を認識し、安全性を考慮し少し大回りに軌道が計画されている。1周期前の軌道計画である Fig.4.5(d)と比べるとそのことはよくわかる Fig.4.6 は誘導実験を行ったときの自律移動ロボットの走行軌道である。安全性を十分に考慮され、出来るだけ短距離に走行できていることが確認できる。

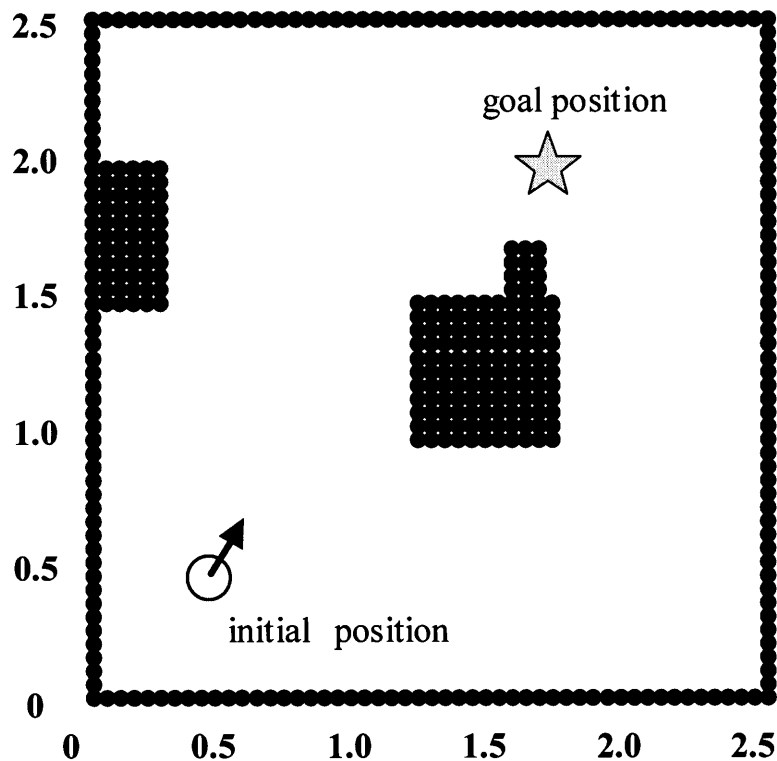
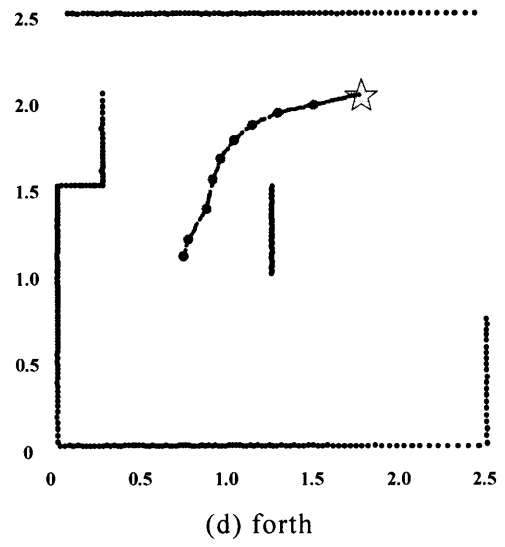
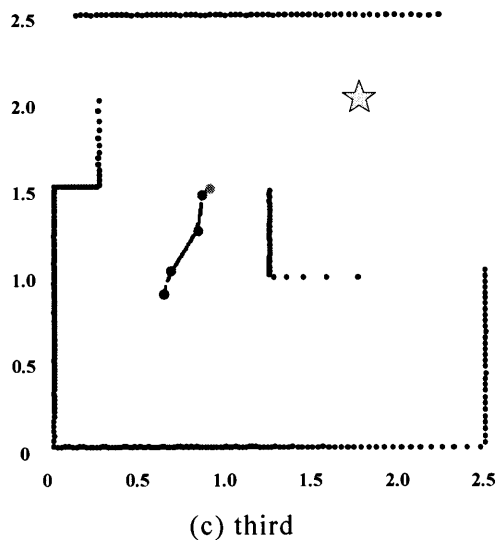
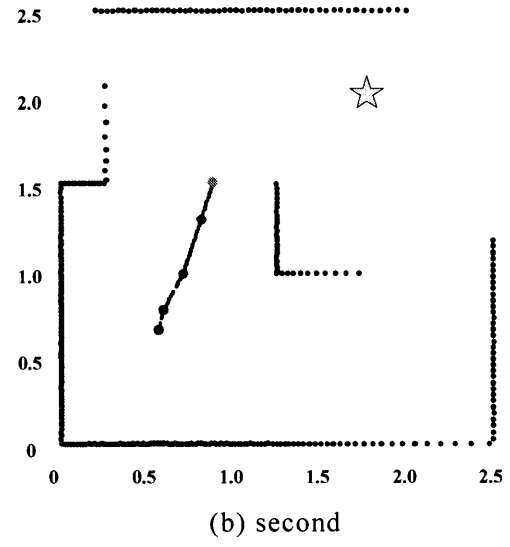
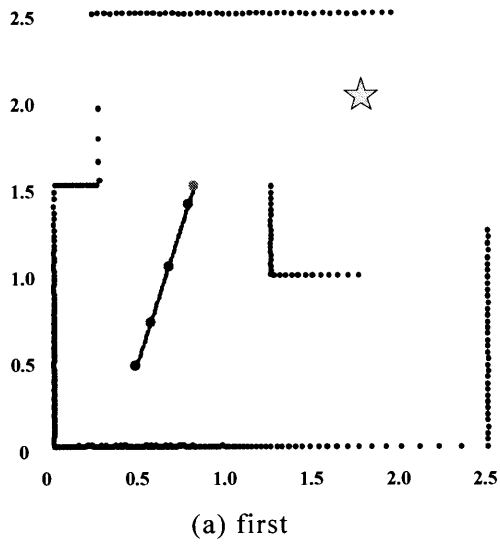


図4.4 実験環境

Fig. 4.4 Environment on Experiment



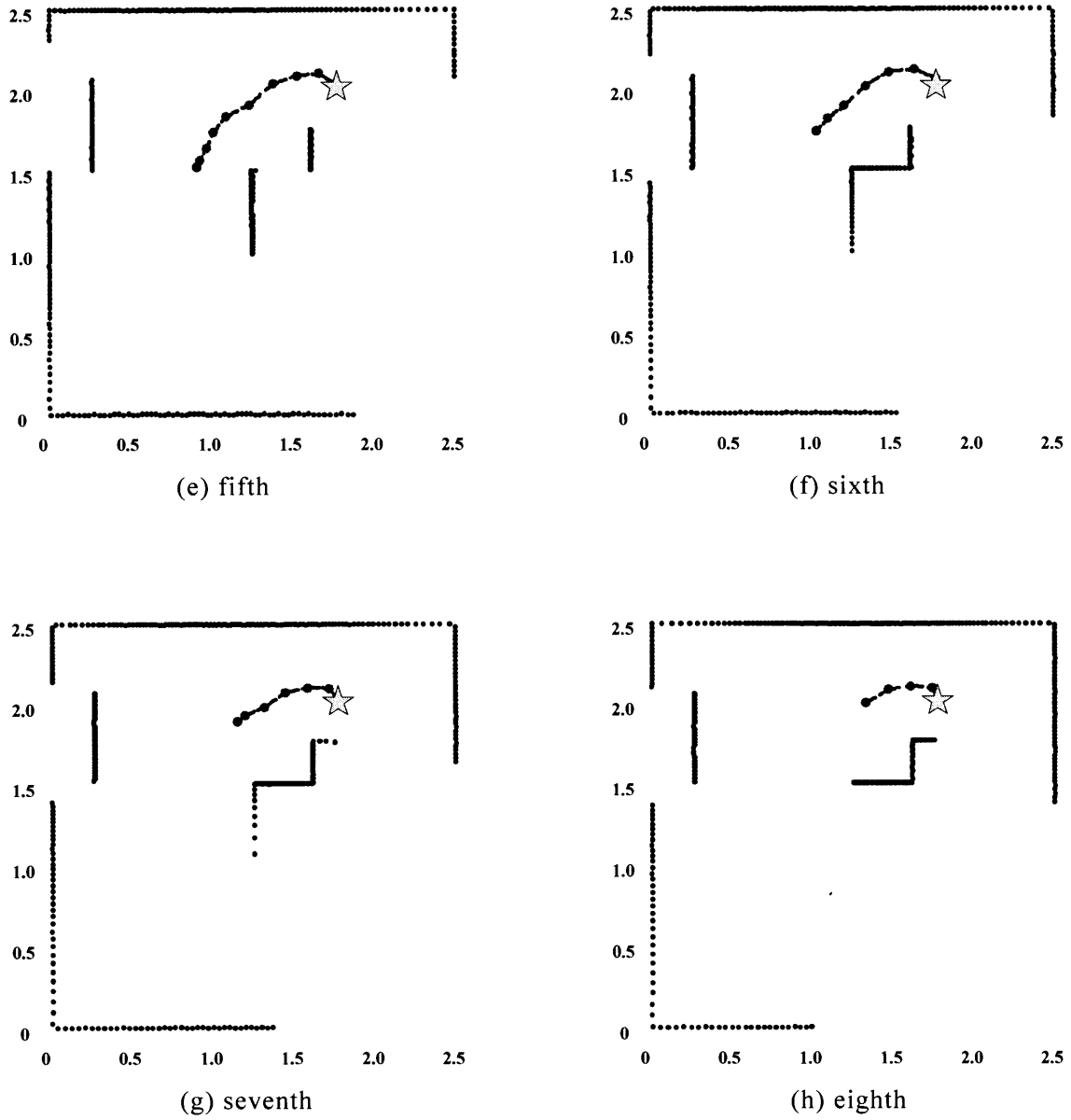


図4.5 軌道計画の更新の様子

Fig. 4.5 Transition of Update of Trajectory Planning

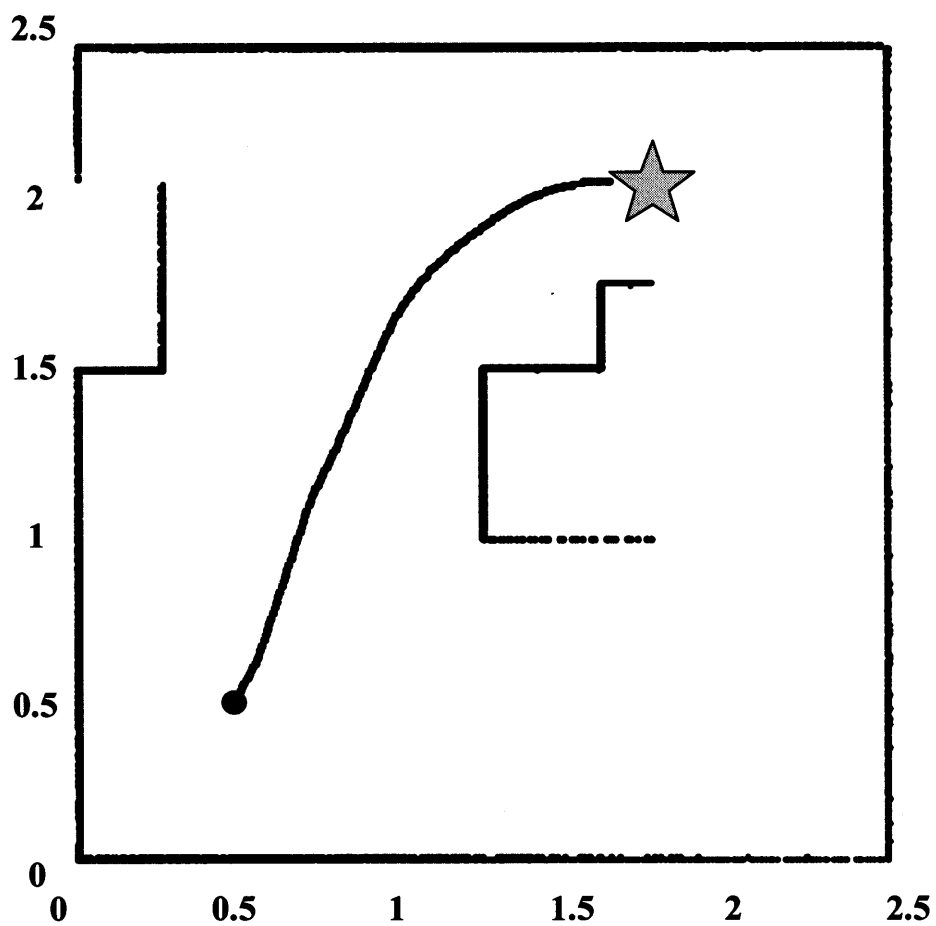


図4.6 走行軌道の結果
Fig. 4.6 Result of Running Trajectory

第5章

結言

本研究では、自律移動ロボットを目標位置まで誘導するための軌道計画法を提案した。従来[7]では、ユーザ仕様の軌道計画を行う方法が提案されていた。これは安全性や速度に条件を持たせるなどの仕様を満たした軌道計画が行える。しかし、軌道計画に要する時間が2[sec]であり、走行しながら軌道計画を行うには問題がある。したがって、未知環境下や動的環境下での適応は困難であった。そこで、安全性や出来るだけ短距離で走行できる軌道計画に加え、未知環境下や動的環境下に適応するためにリアルタイムで軌道を計画できる軌道企画法を提案した。

提案する軌道計画法は、まず大まかな軌道を計画する小目標点決定を行う。これは、複数存在する開口部からどの方向の開口部に進むのかを決定する開口部決定と、決定された開口部中の何処を通過するのかを決定する位置決定を行い、小目標点の決定を行うものであった。

次に、小目標点までの詳細な軌道を計画する経路点決定を行う。これは、安全性や小目標点の方向に進んでいくような評価により経路点を決定した。その際、計算コストを低減するために、経路点候補を作る円の半径の決定法についても提案した。

最後に、決定された小目標点、経路点を補間する経路生成を行う。経路生成には滑らかで走行しやすい clothoid 曲線と直線軌道を組み合わせて行う。

提案手法である軌道計画法の有効性を確かめるために実機による誘導実験を行った。走行することによりロボットから見た環境は変化する。このように変化する環境に対して軌道計画を更新することによりより良い軌道が計画されている事を確認した。また、軌道計画に要する時間は数十[sec]と動的環境下でも十分に適応できる時間であることを確認した。

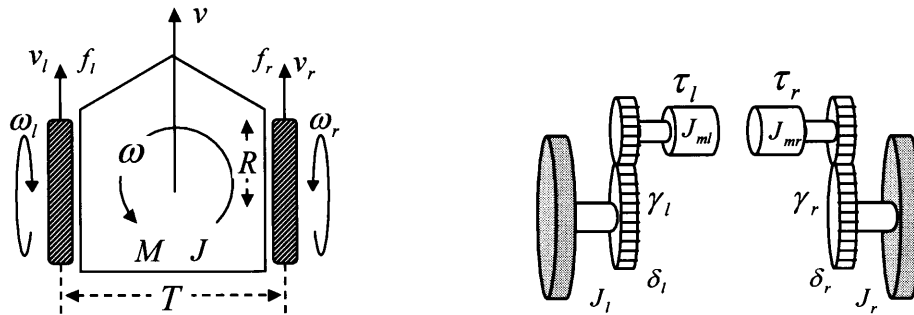
今後の課題は、実際の距離センサを用いての誘導実験を行うこと。また、動的環境下での誘導実験を行うことである。動的環境下での適応には移動する障害物がどのように移動しているか予測する必要がある。したがって、センサにより得られた情報から移動する障害物の予測するアルゴリズムの追加することで、動的

環境下に対しても自律移動ロボットを目標位置まで誘導できるであろうと考えられる。

付録

A. 移動ロボットのパラメータ

本研究で用いる移動ロボットのパラメータについて Fig.A.1, Table.A.1 に示す.



図A.1 移動ロボットの各パラメータ
Fig. A.1 Parameter of Mobile Robot

表5.1 移動ロボットの各パラメータ

Table 5.1 Parameter of Mobile Robot

M	Robot Mass	10	[kg]
J	Robot Inertia	0.12363	[kgm ²]
$J_{r/l}$	Wheels Inertia	5.4×10^{-4}	[kgm ²]
$J_{mr/ml}$	Motors Inertia	6.89×10^{-7}	[kgm ²]
$\delta_{r/l}$	Wheels Friction Coefficient	0.02	[kgm ² /s]
T	Tread Length	0.337	[m]
R	Wheels Radius	0.065	[m]
$\gamma_{r/l}$	Gear Ratio	16	
$\tau_{r/l}$	Motors Torque		[Nm]
v	Robot Velocity		[m/s]
$v_{r/l}$	Wheels Velocity		[m/s]
ω	Robot Angular Velocity		[rad/s]
$\omega_{r/l}$	Wheels Angular Velocity		[rad/s]
$\omega_{mr/ml}$	Motors Angular Velocity		[rad/s]
$f_{r/l}$	Wheels Driving Force		[N]

B. ファジィ意思決定

<一対比較法による重みの決定>

ここでは，経路点決定の際に用いる2つのファジィルール(安全性のルール，目標位置・小目標点のルール)の重みを一対比較法により決定する手順を説明する。ただし，3.3.3で説明したうちの $d_3 < 1.5[m]$ のときについてのみを挙げる。

- (1) 比較するファジィルールに対して一対比較を行う。

目標位置・小目標点のルールは安全性のルールよりやや重要

- (2) 一対比較を行ったものに対して，Table2.3の一対比較表により一対比較行列の要素である a_{ij} (B.1)式を求める。

$$a_{12} = 2 \quad (\text{B.1})$$

- (3) 一対比較行列のそれぞれの要素を求め，一対比較行列 A (B.2)式を作成する。ただし，対角要素 $a_{ii} = 1$ であり， $a_{ji} = 1/a_{ij}$ とする。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

- (4) 作成された一対比較行列 A の最大固有値 λ_{\max} (B.3)式を求める。

$$\lambda_{\max} = 2 \quad (\text{B.3})$$

- (5) (4)で求めた最大固有値 λ_{\max} に対する固有値ベクトルを求め，それを正規化したものが重要度 W (B.4)式となる。ただし， w_1 は目標位置・小目標点のルールの重要度であり， w_2 は安全性のルールの重要度である。

$$W = [w_1, w_2]^T = [0.6666, 0.3333]^T \quad (\text{B.4})$$

- (6) (5)で求めた重要度にファジィルールの数(2個)を掛けて重み α (B.5)式を求める。

$$\alpha = 2W = [1.3333, 0.6667]^T \quad (\text{B.5})$$

以下，同様にして重みを求める。

参考文献

- [1] 松日楽信人, 大明準治: 「わかりやすいロボットシステム入門」, オーム社
- [2] 太田順, 倉林大輔, 新井民夫: 「知能ロボット入門-動作計画問題の解法-」, コロナ社
- [3] 根岸善朗, 三浦純, 白井良明: 「全方位ステレオとレーザレンジファインダの統合による移動ロボットの地図生成」, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.6, pp.690-696 (2003)
- [4] Feng Lu, Evangelos Milion: "Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans", Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.18, pp.249-275 (1997)
- [5] 小島広久, 江口幸弘: 「楕円ポテンシャル場の局所最小点検出による2次元移動ロボットの動作計画法」, 日本機械学会論文集(C編), 68巻, 670号, pp.176-182 (2002)
- [6] R.Chatila, J.-P.Laumond: "Position Referencing and Consistent World Modeling for Mobile Robots", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp.138-145 (1985)
- [7] 小方博之, 新井民夫, 太田順: 「時変環境でのユーザ仕様を考慮した移動ロボットの軌道計画法」, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.6, pp.905-910 (1994)
- [8] 飯田重喜, 油田信一: 「車輪型移動車の走行制御-移動車の動特性を考慮した速度制御-」, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.913-915
- [9] 橋本幸男, 王碩玉, 土谷武士, 松田敏彦: 「経路の未来情報を用いた二輪移動ロボットの軌道生成法」, 第6回計測自動制御学会制御部門大会 2006, pp.177-180
- [10] 水元雅晴: 「ファジィ理論とその応用」, サイエンス社

-
- [11] 坂和正敏：「ファジィ理論の基礎と応用」，森北出版所
- [12] 石川裕記，白崎宏行，福定勇希，内藤治夫：「クロソイド曲線を用いた二輪移動ロボットの軌道生成法」，第6回計測制御学会制御部門2006，pp.177-180
- [13] 佐藤信武：「ExcelとAutoCAD LTによる道路平面線形的设计と作図」，森北出版

謝辞

本論文は、筆者の三重大学大学院工学研究科 博士前期課程電気電子工学専攻在住中における研究活動の成果をまとめたものであります。

本研究の遂行および本論文の作成にあたり、熱心なご指導と適切なお意見を賜りました三重大学教授 平井淳之先生に深く感謝いたします。また先生には機会のある度に技術者、研究者、そして社会人の先輩として貴重なご意見を頂き、併せてこの場を借りて感謝いたします。

本研究の遂行および本論文の作成にあたり、適切な御指導と御助言を頂きました同大学助教授 駒田諭先生に深く感謝いたします。

また日頃から本研究の遂行および学生生活において、貴重な御意見を頂きました同大学助手 弓場井一裕先生、同大学技術職員 中村勝氏に深く感謝いたします。

本論文の作成にあたり、査読頂き貴重な御意見を頂きました同大学講師 山村直紀先生に深く感謝いたします。

研究室の同期として時には切磋琢磨し合い、時には互いを励まし合い研究を遂行してきた小田尚平君、作石翼君、中村太君、前川悠生君、三輪修靖君、若山直矢君に深く感謝いたします。

同じ研究グループとして共に研究を進め、貴重な経験を頂いた蛭川達彦君、入門真生君、中村亮太君に深く感謝いたします。今後の活躍を心より期待しております。

また、何かと至らない自分を受け入れ、多くの御協力を頂き、学部から大学院までの三年間の研究生活を充実したものにしてくれた電機システム研究室の皆さんに深く感謝いたします。電機システム研究室の更なる発展を心より願っております。

最後に、大学院まで進学する機会を与えて下さり、さらには何一つ不自由なく学生生活を送らせて頂いた両親・祖父母に心から感謝します。

論文目録

- [1] 宮崎真吾, 駒田諭, 平井淳之: 「自律移動ロボットのためのファジィ意思決定を用いたマッピングと軌道計画に関する研究」, 平成 17 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, O-533 (2005)
- [2] 宮崎真吾, 駒田諭, 平井淳之: 「自律移動ロボットのための環境マップ生成に関する研究」, 平成 17 年三重地区計測制御研究講演会講演論文集, pp.B5-1-B5-6 (2005)
- [3] 宮崎真吾, 駒田諭, 平井淳之: 「自律移動ロボットの軌道計画-ファジィルールによる小目標位置・参照点決定-」, 平成 18 年三重地区計測制御研究講演会講演論文集, pp.P28-1-P28-6 (2006)