

移動ロボットによる環境理解

金山 裕 飯島純一 油田信一
(筑波大学) (電気通信大学) (筑波大学)

0. はじめに

移動可能な知能ロボットはスタンフォード研究所[1]、カリホルニア大学バークレイ校[2,3]、カリホルニア工科大学[4,5]、LAAS[6]、MIT等で開発されてきた。筆者等も自立ロボット「山彦」を開発し、多くの応用の可能性を探ってきた[7,8,9]。

移動ロボットの有用性は、それが(少くとも)2次元の世界の中を自由に移動できることから派生している。しかし、世界の中を移動して有意義な仕事をするためには、ロボットは環境の地理を理解していなければならない。「環境を理解する」ということの内容は環境を記述することと、ロボットの環境内での現在位置を記述することの2つに分解できる。

世界を小さな正方形に分割し、各位置に対象物が有るか無いかを1ビットの情報で表現する。いわゆる“グリッドモデル”が多くの人達によって提案されている[1,3,5]。一方、Giralt等は、世界を多くのセルに分割し、それらの間の結合関係を記述することによって環境を表現する方法を提案している[6]。しかし、地図の情報を、図形によって表現することは、ロボットのプランニングを行う際には極めて不適当と言わねばならない。

これに対して、世界を点の集まりと見なして地図を作り上げてゆく方法を筆者らは提案する[9]。そもそも、複数個の点の相対的關係を記述する方法としては、(1)直角座標を固定する方法、(2)基準方角を固定する方法、(3)原点も方角も固定しない方法、の3通りが考えられる。これらの方法はそれぞれ得失があるが、本稿は(2)を提案する。世界の中で方角を固定する方法は、人間が地理を理解しているやり方に近いものと思われる。というのは、我々は道路を歩いているときその道路の方角をつねに意識しているからである。これについては第1節で述べる。

上記の方針を決定した後も、世界の記述法は一つには定められない。というのは、ロボットのとり得る経路の自由度が大きい場合と小さい場合では記述法を変えるのが適当だからである。これについては第2節で述べる。

1. 基準方角

2次元の世界は、次節で詳しく述べるように、複数個の点あるいは線分の位置関係を表現することによって、容易に定義できる。最も簡単な3点、 P_1 、 P_2 、 P_3 の位置関係を定義することと試みよう(図1参照)。この世界にどのような座標を固定して考えるかによって場合が少くも3つに分けられる。

P_3 _x

$\times P_2$

$\times P_1$

図1. 3点の位置関係

- (1) XY座標をこの世界に固定するとき。各 P_i は座標 (X_i, Y_i) によって記述できる。この方法は単純なところが利点である。しかし、このデータには構造が全くないため、「ある点の近傍にはどのような点があるか」といった質問に答えるのも容易でない。この方法では6つのパラメータにより、3点の位置関係がきまる。
- (2) 基準方角をこの世界に固定するとき。即ち、上記(1)の方法において、方角と原点の両方を決める代りに、前者だけを決めたものである(図2参照)。この場合には2つのベクトルによって3点の位置関係が規定できる。つまり4つのパラメータが必用である。
- (3) 原点も方角もこの世界に固定しないとき。このときは3点の位置関係を、3角形 $P_1P_2P_3$ の3辺を与えることによってのみ規定できる。つまり3つのパラメータが必用である。

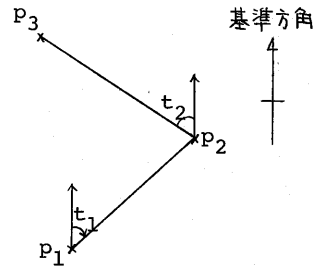


図2. 基準方角の下での位置関係

以上の考察により、多くのものを座標で与えると、より少ないデータによって地図の情報が与えられるという(自明な)結果が得られる。上記のうち筆者らが(2)を提案しようとするのは次の理由による。

- (a) ほとんどすべての建物の廊下はある方向と、その直角方向に走っており、われわれはその建物内を移動するときその方向をつねに意識している。また多くの街路も同様の構造をもっている(東京のような不規則な道路をもつ都会を別にして)。従って、ロボットにも同様な方向感覚を(環境認識を助けとして)持たせること、また地図を記述するときに基準方角を定めることは自然なことと考えられる。
- (b) 地図に原点を定めることは避けたい。というのは、われわれが世界を理解するとき、その観念を利用していることは稀だからである。我々は1つの地点だけをとりあげて、その点のXY座標を考える、ということはない。2地点が南北に(あるいは東西に)、どれだけ離れている、という考え方をする。

屋外では、磁石をロボットに装着することによって基準方角の感覚を持たせることができる。しかし、このような絶対的な方位センサを持たせなくとも、建物のように、世界そのものに明確な方角づけがなされている場合には、ソフトウェアによりその感覚を持たせることが可能である。というのは、ロボットの足や目の感覚が不完全であっても、その誤差が累積して、決定的に方角の感覚を失うことはないからである。しかし砂漠などにおいては磁石のような絶対的な方位センサが必要であろう。

2. 移動経路の自由度

世界の中を移動する経路のとり方の自由度はいらうである。図3は噴水が中央にある四角い広場で、図4はH字型の廊下をもつ建物である。両世界において P_1 から P_2 へ至る経路を考えると、図3ではかなり自由に選ぶことができるが、図4で

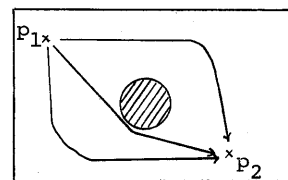


図3. 経路のとり方の自由度の大きい世界

はそうでない。

我々の日常生活における活動の場も、2通りのものがある。運動場、ホテルのロビー、駅の構内等は前者に属する。劇場の内部、建物の廊下、町中の道路、町と町をつなぐ道路などは後者に属する。即ち、ロボット（及び人間）の活動する2次元世界は上記の如く2つに大別される。(a)比較的に障害物が少く、従って障害物を記述するのが容易である世界、(b)比較的に自由空間が少く、ロボット（又は人間）の通れる道路と記述するのが容易である世界。もちろん、両者の特徴をある程度ずつもつ世界とか、両世界が混合して作られている世界も存在する。

次の第3、4節において、それぞれの特徴をもつ世界の記述法について述べる。ロボットがこの世界の中を移動しているとき、各時点における位置を、ロボットは認識していなければならぬ。その位置の表現は動的データと呼ばれるが、それについては第5節で述べる。

3. 障害物の記述法

図5の世界Wを考えてみよう。この世界は障害物が比較的に少い例である。この世界の各対象物に少くも1個の代表点を定める。例えば、四角い机と円いテーブルについてはそれらの中心を代表点とする。また壁に対しては端点の一方を代表点とする。各代表点には固有名詞（ここでは P_i と表わす）がつけられているものとする。

ある世界の対象物の代表点の集合をスケルトンと呼ぶ。Wに対するスケルトンを図6に示す。スケルトンの幾何学的構造を記述するために、スケルトンに有向辺をつけ加えて、全体を連結グラフとする（図7参照）。各有向辺によって隣接する2点の関係はその距離 l と方向 θ によって決定される。このデータをすべての連結グラフについて集めたりすとR-リストと呼ぶ。図7に対するR-リストは $((P_1, P_2, t_1, \theta_1), (P_2, P_3, t_2, \theta_2), (P_1, P_4, t_3, \theta_3))$ である。

一方、各代表点とそれが代表する対象物との関係を明示するデータが必要である。それをI-リストと呼ぶ。I-リストの要素は $(P_1, \text{CIRCLE}, 50), (P_2, \text{SQUARE}, 100, 0), (P_3, \text{WALL}, 250, -\pi/4)$ などであり、第1項は固有名詞、第2項は対象物の型、第3項以後は大きさや置かれてい

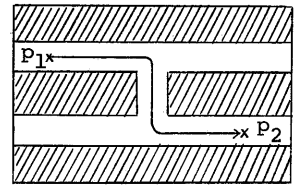


図4. 経路のとりの方の自由度の小さい世界

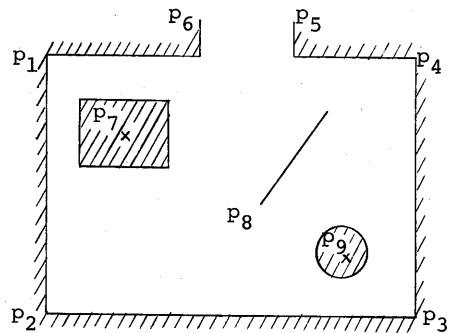


図5. 世界W

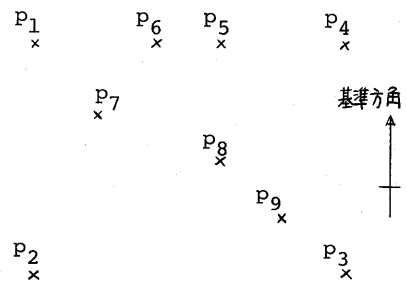


図6. Wのスケルトン

る方角をそれぞれ表わしている。

この方法と広い世界に単純に適用すると、代表点の個数が大きくなり、必要な情報の探索やロボットの経路発見に莫大な時間を要することになる。それを避けるためには、R-リストを構造化するのがよい。例えば1つの建物を記述する場合に、先ず、廊下と部屋の位置関係を上位レベルのR-リストとし、その中で代表点として出てくる部屋や廊下の細部を更に下位レベルのR-リストによって記述する。この構造化は通常の地図について行われているところである。

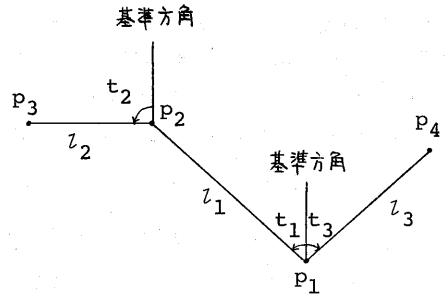


図7. 連結グラフの記述

4. 経路の記述法

図8に示したのは、建物の廊下の一例である。このような世界では、ロボットのとり得る経路の自由度は大きくない。ここでreference lineと呼ぶのは、ロボットの想定される経路であり、必ずしも廊下の中心線ではない。このreference lineを基準として建物の壁などを記述しようとしている。また、ここでは廊下は直線状であると仮定している。必ずしも互に直交していなくともよい。reference lineの交点を節 (node) と呼ぶ。reference lineの集まりをスケルトンと呼ぶ。節はこの世界を各部から構成するために必要である。図8は5本の直線状の廊下から成るが、それらをセグメントと呼ぶ。セグメント $S_1 \sim S_5$ は図9に示す通りである。各セグメント S はその向き D とセグメントベクトル V によって定義される。 $S=(D, V)$ 。 D はそのreference lineの向き(例えば S_1 においては西向き)を示している。セグメントベクトルはセグメントの中で、reference lineから両側までの距離が等しい部分の連なりとみて記述される。その中にいくつかの節と、

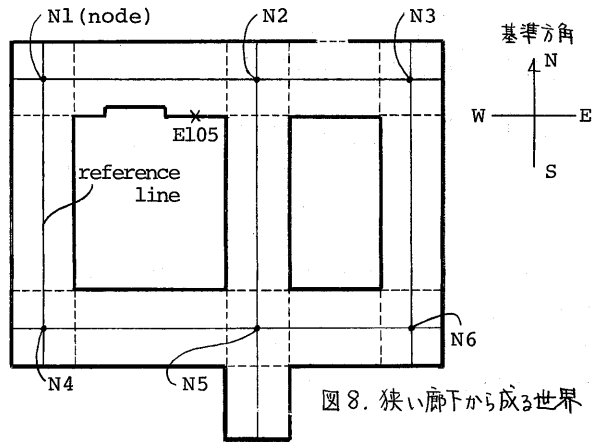


図8. 狭い廊下から成る世界

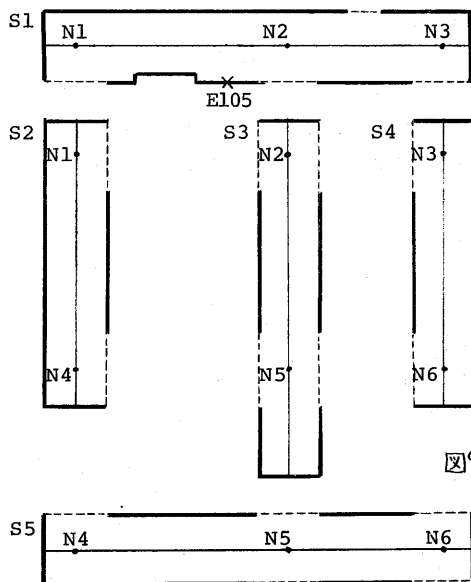


図9. セグメント

部屋番号などの固有名詞も記されている。セグメントを結合して世界全体を構成することは、節の名前と、reference lineの向きを用いて可能となる。この方式で世界を記述すると、セグメント表、各セグメントの内容、ロード表、固有名詞表が必要である。(図中 E105 は固有名詞の1つである。)

S_1 を詳しく描くと図 10 のようになる。その記述は $S_1 = (D_1, V_1) = (\text{West}, V_1)$ 。ここで D_1 をセグメント方向、 V_1 をセグメントベクトルと呼ぶ。

$$V_1 = [\text{LENGTH}, (l_1, \text{open}, r), N3, (l_2, \text{open}, r), (l_3, l, r), \\ (l_4, l, \text{closed}), (l_5, l, r), (l_6, \text{open}, r), N2, \\ (l_7, \text{open}, r), (l_8, l, r), (L, \text{name } l), (l_9, l, r), \\ (l_{10}, l', r), (l_{11}, l, r), (l_{12}, \text{open}, r), N1, (l_{13}, \text{open}, r)]$$

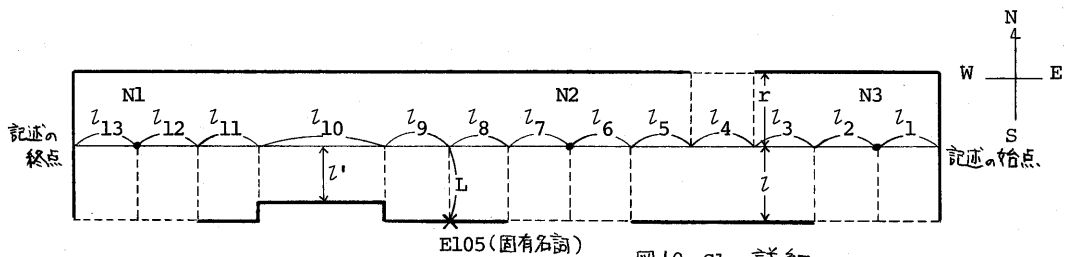


図 10. S_1 の詳細

山彦プロジェクトでは、この方式に従って筑波大学内のある建物の内部の地図を作成中である。

5. 動的データ

動的データは、上の各方式によってそれぞれ次のように記述される。

(1) 障害物が記述されているとき。

ロボットの現在位置と、その正面が向いている方角を示すものが動的データである。ロボットが移動しているときは、このデータは時々刻々変化している。ここではロボットが現在位置から見通せる代表点との位置関係によって現在位置を記述する。即ち動的データは $(s, (p_1, s_1, m_1), \dots, (p_r, s_r, m_r))$ である。ここで s はロボットが向いている方角、 p_i はロボットから見える代表点の一つ、 s_i はその方角、 m_i はロボットと p_i の距離である。これらのデータを更新するアルゴリズムは文献 [9] に詳しい。

(2) 経路が記述されているとき。

このときは reference line からのロボットの相対的位置と、ロボットの向いている方角によって記述される。つまり、ロボットの位置と障害物の位置はスケルトンとの相対的位置関係によって記述される。ロボットが reference line 上を移動しているとき、この動的データの更新は (1) の場合よりも容易である。

文献

- [1] Nilsson, A Mobile Automation, Proc. of 1st IJCAI, pp. 509-520, 1969.
- [2] Smith et al., Design a Low Cost General Purpose Robot, Proc. of 3rd IJCAI, pp. 324-335, 1973.
- [3] Coles et al., Decision Analysis for an Experimental Robot with an Unreliable Sensors, Proc. of 4th IJCAI, pp. 749-757, 1975.
- [4] Dobrotin et al., A Practical Manipulator System, Proc. of 5th IJCAI, pp. 723-732, 1979.
- [5] Thompson, The Navigation System of the JPL Robot, Proc. of 5th IJCAI, pp. 749-757, 1977.
- [6] Giralt et al., A Multi-Level Planning and Navigation System for a Mobile Robot, Proc. of 6th IJCAI, pp. 335-337, 1979.
- [7] Kanayama et al., A Self-Contained Robot "Yamabiko", Proc. of 3rd UJCC, pp.246-250, 1978.
- [8] 飯島他、ロボットカメラマン、第10回画像工学コンファレンス予稿集、pp. 155-158, 1979.
- [9] Kanayama et al., How does a mobile robot understand its world?, Technical Report of IISE, Univ. of Tsukuba, 1979.