

## 移動ロボットの観測行動計画システム†

田 積 誠<sup>††</sup> 谷内田 正彦<sup>††</sup> 辻 三 郎<sup>††</sup>

環境内に存在する物体の特徴についての知識をもとに、センサからの情報を解析してロボット内部の外部環境に関する記述(環境モデル)を更新しながら、移動ロボットが次に行う観測や移動の計画を立てるシステムを作成した。環境モデルは、障害物の位置を表す2次元のマップと、観測された物体の特徴を記述する特徴モデルから成り、それぞれの表現に確実度を与えることによって複数の観測結果の統合を可能にする。また観測や移動の実行は、それを専門に行うシステム外部の独立したエキスパートモジュールに任せ、黒板を用いて情報を受け渡す。そして行動計画は、プロダクションルールを用いて実現し、環境モデルの記述とシステムの状態を調べ前提条件を満足するモジュールに実行命令を与えて、ロボットの行動を決定する。環境として、簡単な直方体から成る世界を仮定し、観測用モジュールとして、ステレオ視、超音波ソナーを利用する場合について、センサから得られると予想されるデータをシステムに与えて、その動作をシミュレーションで確かめた。その結果、モデル更新、および行動決定は可能になったが、ロボットの位置誤差の累積によるセンサ情報の信頼性低下や、実世界での実験は、今後の課題として残った。

### 1. ま え が き

これまでの移動ロボットの研究は、センサを利用して環境を観測し、障害物を回避しながら目的地へ移動して作業することを目標としている<sup>1)~3)</sup>。我々も、視覚情報に基づいて建物内を移動するロボットを研究してきた<sup>4),5)</sup>。しかし、これらはあらかじめ与えられた計画に従って環境観測や移動制御を行う個々のモジュールの開発が中心であり、環境に応じて自律的に行動や観測の計画を立てることはできなかった。

真に自律的なロボットの開発を考えると、これらの個々の技法の研究ばかりではなく、複数のセンサ情報から総合的な判断を下し、与えられた作業を実行するための計画を立てる能力をロボットに与える必要がある。そこで本研究は、ロボットが作業するために必要な知識を総合した知識ベースを構築し、この知識ベースをもとに複数の観測結果から環境モデルを更新し、移動ロボットの次の観測や移動の計画を立てるシステムの作成を試みた。

複数の情報を統合する際の問題は、あい昧なデータや矛盾するデータの存在による総合的な信頼性の低下である。本システムでは、不確実な情報を柔軟に表現できる Dempster & Shafer 理論<sup>6)~8)</sup>を利用して環境モデルを記述しこの問題を解決した。すなわち、ある領域の障害物の有無を記述する2次元マップと、観測

された物体の種類を記述する特徴モデルの2種類の環境モデルを作成し、それぞれの表現に確実度を与えた。

本システムは、環境内に存在する物体が持つ形状特徴についての知識をフレーム構造で持ち、観測によって得られた情報をこの形状知識を用いて解析する。この観測データを解析して環境モデルを更新する機構、および環境モデルとシステムの状態から行動を計画する機構はプロダクションルールで実現した。以下においては、この計画システムの基本構造と、直方体から成る仮想環境でのシミュレーション実験の結果を報告する。

### 2. システムの概要

#### 2.1 作業環境

本研究では、ロボットが行動する範囲として建物の室内などの人工的な環境を考えている。そこでは、ほぼ平坦な床面に計算機、机、本棚などの物体が配置され、壁やドアなどの垂直な面が境界となっている。ロボットは、「計算機の横の机を発見する」といった作業命令に対し、作業計画を作成し実行する。

ロボットには、室内にある物体の持つ特徴についての知識は与えられているが、物体の配置などの知識は与えられていない。したがって、視覚などのセンサを用いて、まず計算機としての特徴を持つ物体を発見し、次にその横の机を見つけるという計画を立てる必要がある。しかし、ロボットの位置からは探すべき物体の目印となる特徴が、他の物体の蔭になってよく見えない場合もある。そのためロボットは図1に示すよ

† Planning of Observation and Motion for a Mobile Robot by MAKOTO TAZUMI, MASAHICO YACHIDA and SABURO TSUJII (Faculty of Engineering Science, Osaka University).

†† 大阪大学基礎工学部制御工学科

\* 現在 松下電器産業(株)中央研究所  
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

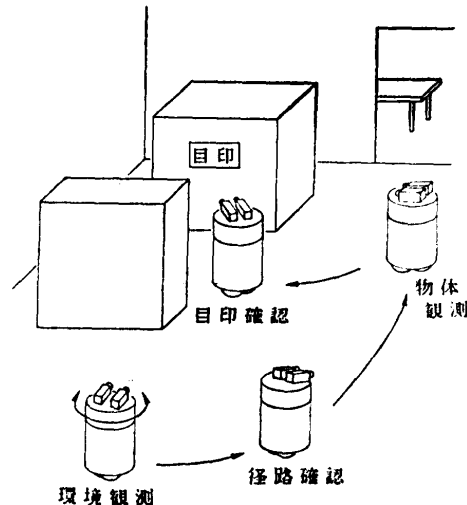


図1 ロボットの観測行動  
Fig. 1 Observation by a mobile robot.

うに、目印の見えると思われる位置に移動し観測する計画をサブゴールとして作成する。

2.2 システム構成

図2に作成したシステムの構成を示す。このシステムは、以下の4つの部分から構成されている。

- (1) 環境モデル：以前の観測で認識された障害物の位置と物体の特徴、およびその確実度を記述する。
- (2) モデル更新機構：物体についての知識を用いてセンサ情報を解析し、環境モデルの記述を更新する。
- (3) 行動計画機構：モジュール実行のための前提条件を知識として持ち、環境モデルやロボットの状態から次の観測地点を決定する。
- (4) 黒板：観測、移動を実際に実行するモジュール（以後、エキスパートモジュールと呼ぶ）からの情報をシステムに受け渡す。

移動ロボットはヒース社のHERO ROBOT Model ET-18を対象とする。このロボットは3車輪のうち前輪の角度と回転数を制御して移動し、センサとしては超音波ソナーを持つ。また、上部にTVカメラ2台を設置してステレオ視を可能にした。ソナーとTVカメラは、垂直軸回りに回転して周囲を観測できる。

本システムは、移動ロボッ

トと無線によって通信するミニコン (FACOM-S 3300, LISP 専用 FACOM α) 上に構築する。なおシステム作成には、エキスパートシステム作成実行用ツールである ESHELL を利用した。この ESHELL は、フレーム構造やルールを登録することにより推論の実行を行うもので、今回の実験でモデル更新機構は15個、行動計画機構は26個のルールを用いて作成し、物体タイプの知識には25個のフレーム構造を用いて2個の物体を登録した。

2.3 エキスパートモジュール

計画された観測や移動は、個々の機能を専門に処理するエキスパートモジュールによって制御される。各モジュールは、移動ロボットに接続されたマイコン上に独立して存在し、実行結果は無線通信によりシステム内の黒板に書き込まれる。今回エキスパートモジュールとして以下のものを使用した。

- (1) ステレオ視：2台のテレビカメラを用いて物体の垂直エッジの長さ、物体と床面の境界エッジのロボット座標系での位置を報告するステレオ視モジュールを作成した<sup>9)</sup>。このモジュールは、視野内の床面も検出し、自由領域として報告する。
- (2) ソナー：ロボットの超音波センサを利用して、前方の角度30度、距離2.5m以内にある物体までの距離を測定することができる。
- (3) 移動：移動径路を与えると、推測航法で約1m移動し、前輪のエンコーダ出力とステアリング角度から、移動後のロボットの世界座標系での位置、方向および予想される誤差範囲を計算する。

3. 環境モデル

ロボットが、環境内を移動しながら与えられた命令を実行するためには、障害物の回避・物体の識別とい

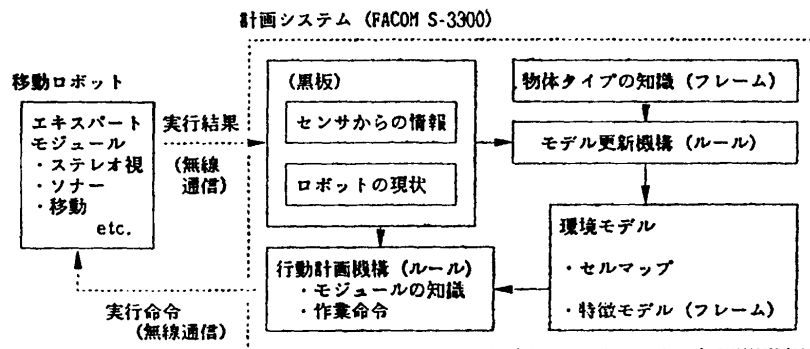


図2 システム構成  
Fig. 2 Planning system structure.

う2つの作業が必要となる。そこで、本システムでは環境モデルを2つのレベルに分けて記述する。ひとつはロボットの径路計画のために、2次元マップ上に、物体が占有する領域と通行可能な自由領域の情報を記述したセルマップであり、他は環境内の物体認識のために、観測された各物体の種類、位置、方向、特徴を記述した特徴モデルである。

3.1 セルマップ

ロボットの行動範囲の2次元マップを、一辺0.2mの小さな正方形の領域(セル)の集合で表し、各セルに対して、物体が占有している確率と自由領域である確率、およびその不確実度を Dempster & Shafer 理論を応用して与える。一つのセルが持つ情報は(1)式で表現される。

$$\begin{aligned} \text{Free} &= \{ \text{SUPT}_f, \text{PL}_f \} \\ \text{Object} &= \{ \text{SUPT}_o, \text{PL}_o \} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで  $\text{SUPT}_f$  はそのセルが自由領域であるという情報が正しい下限の確率、 $\text{PL}_f$  はその上限の確率を表し、 $\text{SUPT}_o, \text{PL}_o$  は占有領域であるという情報の下限、上限の確率を表す。この時、そのセルが自由領域である確率  $F$ 、物体に占有されている確率  $O$ 、および情報の不確実度  $U$  は(2)式で求まる。

$$\begin{aligned} F &= (\text{SUPT}_f + \text{PL}_f) / 2 \\ O &= (\text{SUPT}_o + \text{PL}_o) / 2 \\ U &= \text{PL}_f - \text{SUPT}_f = \text{PL}_o - \text{SUPT}_o \end{aligned} \quad (2)$$

3.2 Dempster & Shafer 理論の応用

複数の不確実な情報を柔軟に統合し、結果の信頼性を表現する手法に、Dempster & Shafer 理論がある。この理論では、ある事象の信頼性は、 $\{ \text{SUPT}, \text{PL} \}$  ( $0 \leq \text{SUPT} \leq \text{PL} \leq 1$ ) で表現される。 $\text{SUPT}, \text{PL}$  はその事象が正しいことの下限確率と上限確率を表し、 $\text{PL}$  と  $\text{SUPT}$  の差が情報の不確実度を表す。新たにこの事象を支持する観測データが、ある確からしさで得られた場合の信頼性の更新は、Dempster の結合法則<sup>6),9)</sup>を用いて、(3)式のように計算される。

$$\begin{aligned} \text{SUPT}_n &= \{ \text{SUPT} + (\text{PL} - \text{SUPT}) \cdot \text{DATA} \} \\ &\quad / \{ 1 - (1 - \text{PL}) \cdot \text{DATA} \} \\ \text{PL}_n &= \text{PL} / \{ 1 - (1 - \text{PL}) \cdot \text{DATA} \} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで  $\text{DATA}$  は新たな観測データの確からしさを表す確率で、 $\text{SUPT}_n, \text{PL}_n$  は更新後の信頼性の下限、上限である。今、セルマップのあるセルが持つ情報を  $O$  (占有領域)、 $F$  (自由領域) で表し、Dempster & Shafer 理論を応用した時の信頼性の変化を図3に示す。

図3(a)は、セルについて何の観測もなされていない

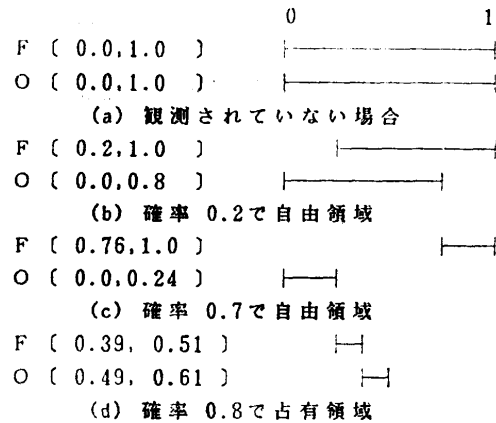


図3 セルの持つ情報の変化  
Fig. 3 Belief-modifications of one cell.

い場合で、信頼性を表す値には初期値が入っている。図3(b)~(c)は、同じセルに対して順次、確率0.2で自由領域、確率0.7で自由領域、確率0.8で占有領域という観測データが得られた時の、セルの持つ値の変化を示す。このように D & S 理論を用いると、観測データの不足は、不確実度 ( $\text{PL} - \text{SUPT}$ ) が大きいことで表せ、これまでに観測されたデータ間の矛盾は、不確実度が小さくそれぞれの情報の持つ確率 ( $\text{PL} - \text{SUPT}$ )/2 がほぼ等しいことで表すことができる。

3.3 物体についての知識

本システムはあらかじめ、環境内に存在する物体に対し、観測できる形状特徴を物体タイプの知識として持っている。人工的な環境では、物体は構造化されているため、この形状特徴は構造的な知識を表現するのに適したフレームで記述する。各タイプには、その物体を周囲8方向から観測した場合に、その方向から見える特徴が記述されている。現在、物体は直方体を仮定しているので、記述される特徴は直方体の4つの側面である。図4に物体タイプの知識の記述方法を示す。

例えば、幅2.0m、奥行1.0m、高さ1.5mの直方体 TYPE-A のタイプ知識は次のように記述される。

```
(TYPE-A (SIDE1 (¥LINK
(RECTANGLE0000)
(MARK0001)))
(SIDE2 (¥LINK
(RECTANGLE0000)
(RECTANGLE0001)))
.....
(SIDE8 (¥LINK
(RECTANGLE0003)
```

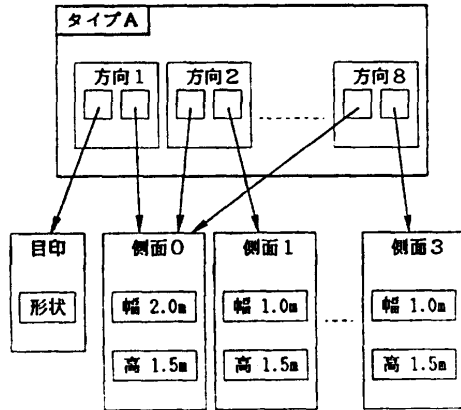


図 4 物体タイプの記述例  
Fig. 4 A description of a object type.

```

(RECTANGLE0000)))
(RECTANGLE0000 (AKO (¥LINK
                    (RECTANGLE)))
(WIDTH (¥VALUE (2.0)))
(HEIGHT (¥VALUE (1.5))))
(RECTANGLE0001 (AKO (¥LINK
                    (RECTANGLE)))
(WIDTH (¥VALUE (1.0)))
(HEIGHT (¥VALUE (1.5))))
.....
    
```

ここで、¥LINK は他のフレームとの関係を表しており、AKO スロットにはそのフレームに関する一般的な知識を記述した上位フレームを記述する。

3.4 特徴モデル

物体を発見すると、物体の位置、特徴、対応する物体タイプの候補とそれぞれの候補の確実度を特徴モデルに記述する。物体の位置は、その物体がセルマップ上で占有するセル番号のリストで表す。またタイプ候補は、物体タイプの知識から観測された特徴と一致する特徴を持つタイプを選択し、次のように記述する。

```

(OBJECT0000 (AKO (¥LINK (OBJECT)))
(CELL (¥VALUE ((1 1) (1 2) (2 1))))
(UNCERTAINTY (¥VALUE (0.76)))
(CANDIDATE (¥LINK (TYPE-A0000)
              (TYPE-A0001))))
(TYPE-A0000 (AKO (¥LINK (TYPE-A)))
(OBJECT (¥LINK (OBJECT0000)))
(SIDE1-DIRECTION (¥VALUE (0.0)))
(CERTAINTY (¥VALUE (0.12)))
(FEATURE (¥VALUE
          ((RECTANGLE0000 0.68))))))
    
```

```

(TYPE-A0001 (AKO (¥LINK (TYPE-A)))
(OBJECT (¥LINK (OBJECT0000)))
(SIDE1-DIRECTION (¥VALUE (90.0)))
(CERTAINTY (¥VALUE (0.12)))
(FEATURE (¥VALUE
          ((RECTANGLE0002 0.68))))))
    
```

ここで、TYPE-A0000 は、物体タイプAが世界座標系での方向1の向き0.0度で置かれていると考えた候補であり、TYPE-A0001 は、90.0度で置かれていると考えた候補の記述である。FEATURE スロットには観測された特徴に対応する物体タイプAの側面と一致度Mが書かれる。CERTAINTYはその候補の確実度の下限確率、UNCERTAINTYはこの物体の不確実度である。直方体の側面の場合、一致度Mは(4)式で与える。

$$M = \frac{\min(OW, TW)}{\max(OW, TW)} \times \frac{\min(OH, TH)}{\max(OH, TH)} \quad (4)$$

ここで、OWは観測された垂直エッジ間の距離、TWは物体タイプの側面の幅、OHは観測された垂直エッジの長さ、THは物体タイプの側面の高さである。

特徴モデルはフレーム構造で記述する。タイプ候補の確実度の更新は、各特徴との一致度を書き込んだ時に、IF-ADDED デモンによって確実度を更新する関数が呼ばれ、(3)式で表される Dempster の結合法則を用いて、その候補の新しい確実度を特徴モデルに書き込む。この時、新しい観測データの確率 DATA は(4)式で与えられる特徴の一致度Mにその特徴が物体認識にもたらす影響を表す確率Iを掛けた値を用いる。この確率Iは、あらかじめ物体タイプの各特徴の上位フレームに記述する。直方体の側面の場合、実験を通じた経験により I=0.2 を用いる。

4. 環境モデルの更新

エキスパートモジュールが実行され、観測結果が報告されると、次のように環境モデルが更新される。

- (1) 観測された物体と自由領域がセルマップ上で占める領域を求め、セルマップの確率を更新する。
- (2) 観測と一致する特徴を持つ物体を、物体タイプの知識から選択して候補とし、特徴の一致度を求める。
- (3) すでに特徴モデルに登録されている物体の位置と観測された物体の位置を比較し、共通部分が多ければその物体の記述に新しい候補、および特徴を加え

る。そのような物体が特徴モデルにない場合は、新しい物体として特徴モデルに登録する。

以下ではステレオ視モジュールを例にして、環境モデルの更新方法を説明する。

#### 4.1 セルマップの更新

ステレオ視により、方向  $\theta$ 、距離  $L$  の位置に観測されたエッジは、ステレオ法の原理的誤差から、実際には(5)式で表す  $L_0 \sim L_1$  の距離の範囲内にある。

$$\begin{aligned} L_0 &= FBL / \{FB + L \cos \theta\} \\ L_1 &= FBL / \{FB - L \cos \theta\} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 $F$  はカメラの焦点距離、 $B$  は2台のカメラ間距離 (m) である。

ここで、ロボットの位置誤差半径  $dr$ 、方向誤差  $d\theta$  が存在すると、観測されたエッジの存在する範囲は、図5で示す台形に近い領域に広がる。この範囲内のセルには、物体が存在するという観測データを領域の面積に反比例する確率で与える。また、2本の垂直エッジを結ぶエッジ上の点と、床面が観測された領域上の点についても、それぞれ占有領域であるという観測データと自由領域であるという観測データを同様に与える。データが与えられたセルが持つ情報は、Dempster の結合法則に従い(3)式で求まる値に更新される。

#### 4.2 特徴モデルの更新

観測された物体の情報が黒板に書き込まれると、モデル更新機構は物体についての知識の全タイプについて、8方向から見える特徴に対する一致度を求める。この部分はプロダクションルールで構成されていて、観測された面の高さと同幅が物体の知識に記述されている側面の高さと幅の値以下である場合のみ、一致度を(4)式で計算する。それ以外の場合は、観測物体の候補ではないと判断する。

候補が選択されると、特徴モデルに登録されている物体について、その占有するセル領域と観測された物体の占有するセル領域を比較し、半数以上が一致すれば、その物体に観測された物体の候補と特徴を追加する。どの物体の領域とも一致しない場合は、新しい物体として特徴モデルに登録する。

### 5. 行動計画

今回、移動ロボットに与えられる命令として、「物体タイプAの発見」といった作業を考えている。ただし、物体を発見し確認するために捜すべき特徴と使用するモジュールとは、作業命令において与えるので、

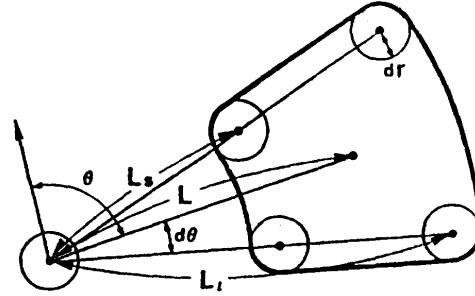


図5 エッジの存在範囲  
Fig. 5 Area of one edge observed by stereo vision.

図4で示される物体を発見する作業の場合は、「ステレオ視モジュールを使用して側面1~4の発見、(発見された候補に対して)物体確認モジュールで目印を確認」という命令が、行動計画機構に与えられる。

#### 5.1 ルールによる行動決定

観測方法についてこれまでの研究で蓄積された知識は、実行の前提条件などの箇条書できる規則的なものが多いため、行動計画機構はプロダクションルールで構成する。これによって、今後新しい観測方法や移動用モジュールをロボットに搭載する場合には、ルールを追加するだけで、容易にシステムを拡張できる。

各ルールは、次の形式で書かれる。

IF 部 黒板に書かれたシステムの状態

THEN 部 状態の修正、モジュールの実行

システムの状態を表す変数には、以下のものがある。

(1) モード: 探索、確認、移動の3種類がある。探索は物体を発見するために、まだ観測されていない未確認領域を観測するモードで、確認は発見された物体タイプ候補の特定の特徴を観測するモードである。移動モードは、次の観測地点へ移動する途中である。

(2) 観測する特徴と使用するモジュール: これらは作業命令によって与えられる。

(3) 対象領域: ロボットによって次に観測される領域をセル番号のリストで記述する。探索モードでは不確実度の大きな未確認領域であり、確認モードでは確認する物体が占有している領域である。

(4) 観測領域: 対象領域を観測するために、ロボットがいるべき位置の範囲をセル番号のリストで記述する。探索モードでは対象領域の周囲であり、確認モードでは観測する特徴があると考えられる方向である。また移動モードでは移動目標領域となる。実際には、システムはセルマップ上の各セルについて、対象

領域からの方向と距離を調べて観測領域を選ぶ。

(5) ロボットの状態: ロボットの位置と方向, それらの誤差を黒板上に記述する。

行動計画ルールの例を以下に示す。

ルール1: IF モジュール=ステレオ  
           ロボット位置=観測領域  
           ロボット方向=対象領域の方向  
           THEN ステレオ視モジュールの実行  
 ステレオ視の実行条件を記述したルールである。

ルール2: IF モード=探索  
           THEN 対象領域=不確実度の大きな領域  
               観測領域=対象領域の周囲

ルール3: IF モード=確認  
           THEN 対象領域=確認する物体の占有領域  
               観測領域=ある特徴が観測できると予想される領域

次の観測位置を決定するルールである。

ルール4: IF モード=探索または確認  
           ロボット≠観測領域  
           THEN 新しい目標(サブゴール)を作り  
               モード=移動  
               移動目標領域=観測領域

移動モードに移るためのルールである。

ルール5: IF モード=移動  
           ロボット位置=移動目標領域  
           THEN 移動モードの終了

移動モード(サブゴール)を終了し, 観測を再開するためのルールである。

### 5.2 セルマップを用いた径路計画

移動径路の計画はセルマップの各セルの中心をノード, 隣接する8近傍のセルへの接続をアークと考え, 横形探索で行う。計画された径路が通行可能かどうかは, 径路上のセルについて(2)式で与えられる自由領域の確率  $F$ , 占有領域の確率  $O$ , 不確実度  $U$  による。このため, 行動計画機構に次のルールが加えられる。

ルール6: IF モード=移動  
           径路上のセルについて  
                $F > p$   $U < q$   
           THEN 移動モジュールの実行

径路が確実に自由領域である場合は移動を開始する。ここで,  $p, q$  は移動用モジュールによって与えられるしきい値である。

ルール7: IF モード=移動

径路上のセルの,  $O > p, U < q$

THEN 径路計画のやり直し

径路上に物体があると判断し, 新径路を計画する。

ルール8: IF モード=移動

径路上のセルの,  $U > q$

THEN モード=確認

モジュール=ステレオ

対象領域=径路上のセル

径路についての観測が不足していると判断し, ステレオ視による観測をサブゴールとする。

ルール9: IF モード=移動

径路上のセルの,  $U < q, F, O < p$

THEN モード=確認

モジュール=ソナー

対象領域=径路上のセル

径路に対する以前の観測は情報が矛盾し判断がつかないので, ソナーによる確認をサブゴールとする。

## 6. 実行例

今回は直方体から成る世界を仮定し, ステレオ視から得られると予想されるデータをシステムに与えて, その動作をシミュレーションで確かめるといふ実験を行った。以下は, その代表的な例である。

図6で示すように, 環境内に2つの物体がありロボットからは物体2の影になって物体1の一部が見えない状況において, 本システムに対してタイプAの物体

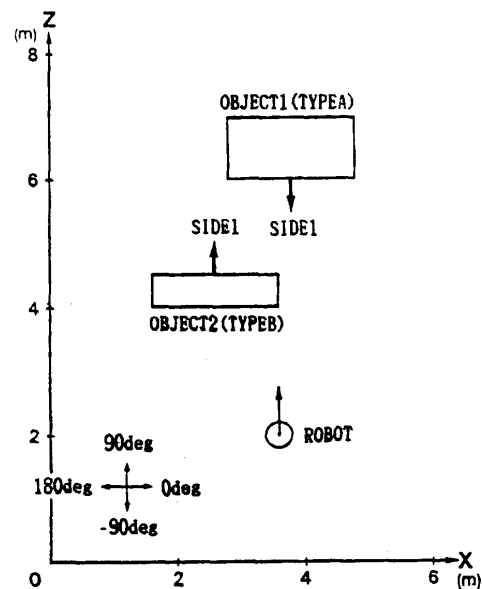


図6 作業環境

Fig. 6 Environment of a mobile robot.

を発見するという命令が与えられた場合のシステムの動作を示す。物体1はタイプA (幅 2.0m, 奥行 1.0m, 高さ 1.5m) の直方体で世界座標系での方向1の向きは  $-90$  度, 物体2はタイプB (幅 2.0m, 奥行 0.5m, 高さ 2.0m) の直方体で方向1の向きは  $90$  度である。またロボット位置は, 座標 (3.6m, 2.0m) で方向は  $90$  度, 位置誤差と方向誤差はそれぞれ 0.1m,  $3.0$  度である。

この時「物体タイプAをステレオ視モジュールを用いて発見する」という命令が与えられると, システムは探索モードに入り, ルール2によって図7に示すような対象領域と観測領域を決定する。図中の破線は, ステレオ視モジュールの視野範囲である。

次に, ルール1によってステレオ視モジュールが実行される。観測結果によるセルマップの変化を図8に示す。この時, 特徴モデルには2つの物体が登録される。そのうち, 物体1に対するタイプAの候補の記述は次のようになる。

```
(OBJECT0001 (UNCERTAINTY
              (¥VALUE (0.5)))
 (CANDIDATE (¥LINK (TYPE-A0001
                    (TYPE-A0002))))
 (TYPE-A0001 (SIDE1-DIRECTION
              (¥VALUE (0.0)))
 (CERTAINTY (¥VALUE ((0.1)))
 (FEATURE (¥VALUE
            ((RECTANGLE0003 0.8))))
 (TYPE-A0002 (SIDE1-DIRECTION
              (¥VALUE (-90.0)))
 (CERTAINTY (¥VALUE (0.07)))
 (FEATURE (¥VALUE
            ((RECTANGLE0000 0.6))))))
```

ここで, 物体1は一部が見えないために, 実際とは方向の異なった候補である TYPE-A0001 の確実度が大きくなっている。そこでタイプAである確実度が一番大きな候補 TYPE-A0001 に対して, ステレオ視モジュールを用いて, 方向1にある特徴 RECTANGLE-0000 を確認するという作業命令が与えられる。システムは確認モードに入り, ルール3によって, 図9に示す新しい対象領域と観測領域が計画される。しかし今回はロボット位置と観測領域が異なるため, ルール4によってシステムは移動モードに移る。観測領域に移動することをサブゴールとし, 径路が計画される。図9の点線は, 計画された径路を示す。

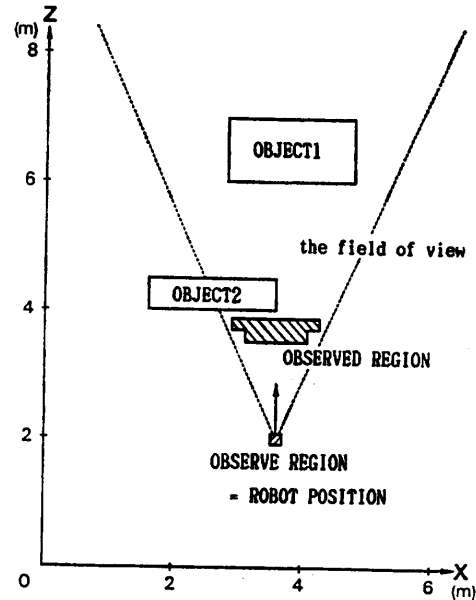


図7 探索モードによる観測計画  
Fig. 7 An observation plan in search mode.

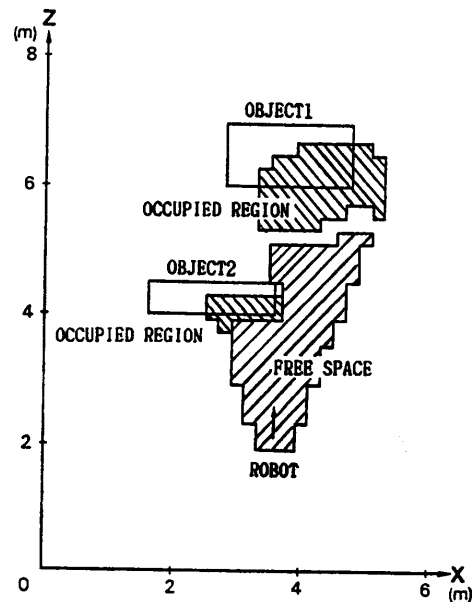


図8 観測結果  
Fig. 8 The cell-map after an observation.

しかし, 径路上のセルの不確実度が大きいので, ルール8によりパスの先頭のセルに対して, ステレオ視モジュールを用いた観測が実行される。その結果, セルマップ上に自由領域が広がり, ルール6によって移動モジュールが実行される。そして, 移動目標領域にロボットが達すると, ルール5によって移動モード

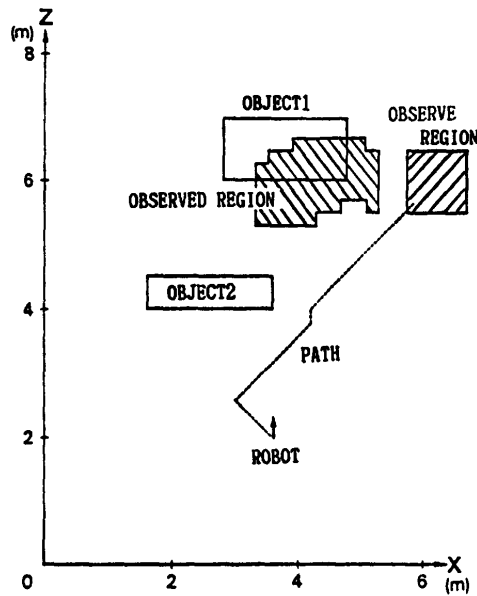


図9 確認モードによる観測計画

Fig. 9 An observation plan in identify mode.

が終了し、図9に示したステレオ視モジュールによる観測が実行される。この観測の結果、特徴モデルでの物体1の記述は次のように更新される。

```
(OBJECT0001 (UNCERTAINTY
              (¥VALUE (0.33)))
 (CANDIDATE (¥LINK (TYPE-A0001
                    (TYPE-A0002))))
 (TYPE-A0001 (SIDE1-DIRECTION
              (¥VALUE (0.0)))
 (CERTAINTY (¥VALUE (0.06)))
 (FEATURE (¥VALUE
            ((RECTANGLE0003 0.8))))
 (TYPE-A0002 (SIDE1-DIRECTION
              (¥VALUE (-90.0)))
 (CERTAINTY (¥VALUE (0.1)))
 (FEATURE (¥VALUE
            ((RECTANGLE0000 0.6)
             (RECTANGLE0000 0.97)
             (RECTANGLE0001 0.4))))))
```

候補 TYPE-A0002 の確実度が最大になったため、今後の観測は TYPE-A0002 が対象となる。このように観測、移動を繰り返し、タイプAのある候補の確実度が1に近付くと作業を終了する。

## 7. 検 討

6章の実行例で示したように、一部の形状特徴が類

似した2個の直方体が存在する場合について実験を行い、以下の項目について検討した。

### (1) セルマップの情報の更新

ロボットが移動しながら多地点で観測を行う場合、物体の周辺領域では占有領域である情報と自由領域である情報が両方与えられ、矛盾した情報を持つセルが広がる。特に物体が接近している場合は、物体間の自由領域がセルマップ上では存在しなくなる可能性が高い。この矛盾領域は観測モジュールの精度が低いほど広がるため、この問題は高精度の観測を行うことにより解消する。またこの矛盾領域を避けて移動経路を計画することによって、ロボットが使用できる観測方法の精度に従って物体との安全距離を確保できる。

### (2) 特徴モデルへの物体の登録

観測された物体がすでに特徴モデルに登録されている物体と同じ物体であるかどうかは、物体がセルマップ上で占有するセル領域の過半数が一致するかを調べて判断する。しかしこの方法では、ロボットが移動して物体の反対側から観測した場合などは、同じ物体を別の物体として特徴モデルに登録してしまう。また、接近した2つの物体を1つの物体として登録する危険もある。この問題を解決するには、物体の形状特徴の類似まで調べて特徴モデルを更新する必要がある。

### (3) 行動計画ルールの働き

今回の実験ではエキスパートモジュールが少なく、計画機構のルールも少数であったため、確実に観測計画が立てられたが、システムを拡張した場合にはルール間に矛盾が生じる可能性もある。そこで計画機構のルールを、経路計画グループや観測領域決定グループなどのグループごとに分け、推論の各段階で関連のあるルールのみを検索する方法をとった。これによってルール間の矛盾が減少し、推論時間が短縮するという利点がある。

### (4) ロボットの位置誤差の累積

ロボットが位置誤差を持つ場合、観測された物体の世界座標系での位置は不確かになる。特に、ロボットの向きの誤差は、遠方にある物体の位置に大きく影響を与え、セルマップの確実度を下げる。今回の実験ではロボットの位置誤差を一定としたため、ロボットが物体に近付きながら観測を繰り返すことによってこの影響を減少させたが、移動に伴ってロボットの位置誤差が累積すると考えると、移動しながら観測を繰り返してもセルマップ上の占有領域の確実度が向上せず、範囲が広がる場合がある。この問題を解決するために



現在、環境モデルを世界座標系ではなくロボット座標系で記述する方法を検討している。

## 8. おわりに

本研究は、環境内に存在する物体の形状知識と、移動、観測を行うモジュールの前提条件についての知識をもとに、環境を認識するために必要な、観測や移動の行動計画を立てるシステムの作成を目標とした。

物体に関する知識はフレーム構造を用いて実現し、モジュールに関する知識はプロダクションルールで記述した。そして環境モデルを2次元マップ上での障害物の有無と、観測された特徴に対する物体の候補の記述とに分け、それぞれの表現に信頼性を表す値を加えて、複数の観測結果の統合を可能にした。

直方体から成る世界を仮定し、予想される観測データをシステムに与えるというシミュレーション実験を行った結果、確実度を含む環境モデルの更新、およびルールによる行動決定は可能となった。しかし、実世界でロボットを移動させながら観測結果をシステムに送り、そのデータを利用して計画を立てるというトータルシステムの実験は、今後の課題である。

**謝辞** 本研究は、文部省科学研究費の補助を受けた。

## 参 考 文 献

- 1) Moravec, H. P.: The Stanford Cart and the CMU Rover, *Proc. IEEE*, Vol. 71, No. 7, pp. 872-884 (1983).
- 2) Giralt, G., Chatila, R. and Vaisset, M.: An Integrated Navigation and Motion Control System for Autonomous Multisensory Mobile Robots, *Proc. the 1st ISRR*, pp. 191-214 (1984).
- 3) Andresen, F. P. et al.: Visual Algorithms for Autonomous Navigation, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 856-861 (1985).
- 4) Yachida, M., Ichinose, T. and Tsuji, S.: Model-guided Monitoring of Building Environment by a Mobil Robot, *Proc. 8th IJCAI*, pp. 1125-1127 (1983).
- 5) Tsuji, S., Yagi, Y. and Asada, M.: Dynamic Scene Analysis for a Mobil Robot in a Man-made Environment, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 862-867 (1985).
- 6) Barnett, J. A.: Computational Methods for a Mathematical Theory of Evidence, *Proc. 7th IJCAI*, pp. 868-875 (1981).
- 7) Wesley, L. P. and Hanson, A. R.: The Use of an Evidential-Based Model for Representing Knowledge and Reasoning about Image in the VISIONS System, *Proc. of Workshop on Computer Vision*, pp. 14-25 (Aug. 1982).
- 8) Garvey, T. D. et al.: An Inference Technique for Integration Knowledge from Disparate Sources, *Proc. 7th IJCAI*, pp. 319-325 (1981).
- 9) 鄭, 浅田, 辻: 視差情報を利用したシーンの分割, 第3回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 289-290 (1985).

(昭和61年5月8日受付)

(昭和62年3月25日採録)



**田 積 誠**

昭和35年生。昭和59年大阪大学基礎工学部卒業。昭和61年同大学院修士課程修了。同年松下電器産業(株)入社。在学中、移動ロボットの研究に従事。現在同社中央研究所情報グループに勤務。



**谷内田正彦 (正会員)**

昭和20年生。昭和44年大阪大学工学部卒業。昭和46年同大学院修士課程修了。同年同大学基礎工学部助手。現在助教授。人工知能、コンピュータビジョン、画像処理、移動ロボットなどの研究に従事。工学博士。



**辻 三郎 (正会員)**

昭和7年生。昭和28年大阪大学工学部卒業。昭和30年同大学院修士課程修了。同年電子技術総合研究所入所。昭和45年から大阪大学基礎工学部制御工学科教授。現在人工知能、コンピュータビジョン、ロボティックスの研究に従事。工学博士。