

## パノラマ表現を用いた環境地図の作成

植田健治† 石黒浩†† 辻三郎†  
†大阪大学基礎工学部 ††山梨大学工学部

Constructing Enviromental Map Using a Panoramic Representation

Kenji Ueda †, Hiroshi Ishiguro ††, Saburo Tsuji †  
† Faculty of Engineering Science †† Faculty of Engineering  
Osaka University Yamanashi University

### Abstract

In this paper, we describe about a method to determine the robot position for fusing local maps into a global map for an unknown environment. We do not use internal sensor information such as acceleration, rotation velocity of wheels, and so on. We employ only visual information contained in a panoramic representation.

The robot position is calculated in the coordinate of the global map obtained by fusing the range information observed from previous robot positions. The previous robot positions are already determined in the global map, and we choose one of them as a base point. The new robot position is obtained by calculating the relative motion parameters (rotation, direction and distance of translation) from the base point. We calculate the rotation and moving direction of the motion parameters from FOE. Then the moving distance is remained. Using those determined motion parameters as a constraint, we can restrict the candidates of the robot position along a line. We estimate each candidate by matching the new local map and the global map. The moving distance is determined by selecting the best candidate according to estimation value. Using newly determined robot position, we fuse the local map into global map. We use this improved global map to next

### 1. はじめに

移動ロボットが未知環境の環境構造を獲得する際には、いくつかの観測点を選び、各々の観測点で得られた情報を融合する。これにより、1つの視点からは観測できない部分の情報を補い、観測精度を向上させることができるが、そのためには、融合の際に各観測点の相対位置を正確に求める必要がある。

従来広く行われてきた方法は、ロボットの車輪に取り付けられたエンコーダ等を用いてロボットの運動を直接計測し、ロボットの運動経路を再現することにより、観測点間の位置関係を求めるものである。しかし、この方法は、車輪のスリップなどによる誤差が累積される性質がある。このため、カルマンフィルタを用いたり<sup>1)</sup>、

環境の局所的特徴のマッチングを行ったり<sup>2)</sup>して、誤差を補正する必要がある。

また、視覚フィードバックを用いてロボットの運動を正確に制御することにより、運動パラメータの計算を省略しようとする試みもある。その一例として、ロボットの前方と後方の視覚情報を用い、目標となる特徴点を追跡して、それらの方位角の差が $180^\circ$ となるように制御することにより、ロボットの運動を特徴点を結ぶ直線上に限定する方法がある<sup>3)</sup>。

上記の方法では2つの観測点の位置関係を評価するのに、観測点間のロボットの移動を内界センサで評価したり、視覚情報によりロボットの運動を制御したりしている。本論文では2つの観測点で得られたパノラマ表現に含まれる距離情

報と全方位の視覚情報より、その位置関係を直接計算する方法について述べる。パノラマ表現は、全方位画像と、全方位画像に含まれる特徴点の距離情報により構成される。全方位画像に含まれる画像情報から、ロボットの運動にともなうオプティカルフローを求め、FOEをもちいてロボットの運動方向と回転角を決定する。移動距離はこれらのパラメータを拘束条件として、局所地図と環境地図の照合によって得る。

我々の方法では、観測点間のロボットの移動方法に全く制限がないため、自由度の高い方法であるといえる。

以下の章では、まず、パノラマ表現を構成する全方位画像および単眼全方位ステレオについて述べ、つぎに、パノラマ表現に含まれる視覚情報を用いて観測点の位置決めを行う方法について述べる。また、本手法により求められた観測点の位置関係を用いた、局所地図の融合についても述べる。

## 2. パノラマ表現

### 2.1 カメラ運動と環境に関する仮定

本手法では、次の2つの仮定を用いる。

1. 環境の床面は水平である。
2. ロボットにとりつけられたカメラは、鉛直軸を中心に、床面から一定の高さの水平面上を回転する。

仮定2より、ロボットの位置は水平面内での座標および、鉛直軸周りの回転角のみを決めればよい。

### 2.2 全方位画像

環境認識のように、比較的大きな対象に注意を向けるような動作の場合、環境全体を見回す動作によりできるだけ多くの情報を得るのが望ましい。我々の全方位画像は、カメラの回転運動とスリットを利用して全方位の視覚情報を得る。

図1は全方位画像の撮像方法を示す。垂直軸まわりに回転できるカメラ回転台上にカメラを取り付け、カメラを一定の角度回転させるごとに1枚の画像を撮像する。画像中心を通る十分細い垂直スリットを設定し、スリットを通して得られた画像列を整理させることにより、全方位の視覚情報を1枚の画像中に収めることが出来る。垂直スリットは、画像中心を通る縦一列分のデータを抜き出すことにより実現される。

我々の全方位画像を時空間画像の観点で考えてみよう。回転台を等速度で回転させてえられた画像列を時間軸にそって整理させたものが時空間画像である。これを、図2のように時間軸を含む垂直面で切断するとき、切り口に現れる画像が全方位画像である。

カメラ回転台の1ステップあたりの回転角度をスリットの幅(=1画素の幅)より小さくすることは、全方位の視覚情報を隙間なく得るための必要条件である。しかし、この回転角により全方位画像の方位角分解能が決まるため、1ステップあたりの回転角を非常に小さくすることにより、通常の撮像方法に比べて正確な方位角情報を得ることが出来る。ただし、全方位画像の縦方向の角度分解能は改善されず、通常の画面の1画素の分解能に等しい。

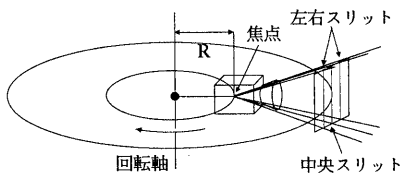


図1 全方位画像の撮像方法

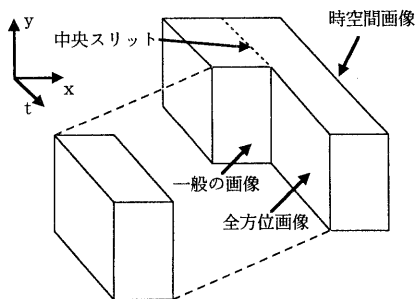


図2 全方位画像と時空間画像

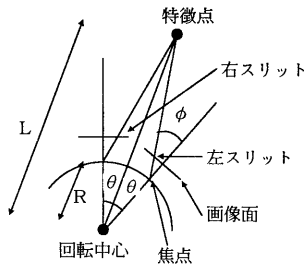


図3 単眼全方位ステレオの原理

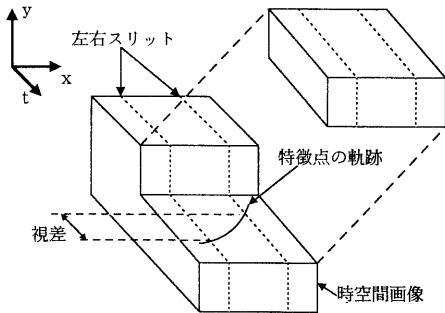


図4 単眼全方位ステレオと時空間画像

### 2.3 単眼全方位ステレオ

全方位画像の際にカメラを回転軸から離れたところに設置することにより、カメラはその運動に並進運動を伴う。このために生じる運動視差を利用することによりステレオ法を行うのが単眼全方位ステレオである。

図3は単眼全方位ステレオの原理を示す。画像中心から左右対称な位置にスリットを設け、一方のスリット上に現れた特徴点がもう一方のスリット上に現れるまでの回転角 $2\theta$ を測定することにより、特徴点までの距離 $L$ を測定する。スリット間の角度を $2\phi$ 、回転軸と焦点間の距離を $R$ とすると、特徴点までの距離 $L$ を式1に示す。

$$L = \frac{R \sin \phi}{\sin(\phi - \theta)} \quad (\text{式1})$$

この方法は、画像中心のスリットの代わりに、左右のスリットを用いて撮像された2枚の全方位画像間の対応を取ることに相当する。

さらに、時空間画像の観点で考えると、左右スリットによる全方位画像は、時空間画像を、時間軸に平行で $t$ - $y$ 平面に関して対称な2枚の垂直

面によって切断した切り口であると考えられる。また、カメラ中心を通る水平面で時空間画像を切断すると、切り口はカメラの光軸を含む平面上の特徴点の移動の様子を示すものとなる。(図4)

視差に相当する角 $\theta$ は、一方のスリット上に現れた特徴点を、1ステップ回転する毎に画像中で追跡し、もう一方のスリットに現れるまでの回転角から求める。特徴点の追跡は、それを含むウィンドウを設定し、SSDA法により行う。このため、均一な輝度を持つ平面に対しては追跡に失敗する可能性がある。したがって、追跡の際、つぎの3つの条件により、追跡結果の信頼度を評価する。

- 1: ウィンドウ内に含まれる特徴の量が多い  
→ 窓内の画素の輝度の分散が大きい。
- 2: 特徴点の移動が滑らか  
→ 特徴点の移動量の分散が小さい。
- 3: 幾何学的拘束条件  
→  $\phi > \theta$ 。

上記の基準で、追跡が失敗したと判断された場合、その点はテクスチャのない平面上にあるものと考え、信頼できる距離情報の間を直線で補間する。

カメラ回転台の角度分解能が $\delta\theta$ である時、特徴点までの距離 $L$ の分解能 $\delta L$ は式2のように示される。

$$\delta L = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{R \sin \phi}{L}\right)^2}}{R \sin \phi} L^2 \delta\theta \quad (\text{式2})$$

$R \sin \theta \ll L$ であるとき、単眼全方位ステレオの分解能は距離 $L$ の2乗に比例し、 $R \sin \phi$ に反比例する。従って、測定精度を向上するには、 $R$ を大きくすればよい。しかし、ロボットへの搭載ということを考えると、 $R$ の大きさにも限度がある。しかし、カメラ回転台の角度分解能 $\delta\theta$ は、比較的容易に小さくできるので、 $R$ が小さくとも十分な精度を得ることができる。

単眼全方位ステレオは、1台のカメラを使用するため、パラメータの較正が容易である。

## 2.4 地図の表現

本研究では、上述のパノラマ表現に含まれる全方位の距離情報を局所地図として用いる。

局所地図の表現は、平面を格子状に分割し、それぞれの樹に障害物の存在確率 $p$ を対応させることにより行う<sup>9)</sup>。各樹の $p$ は、その樹の方位の距離情報および誤差から、図5のような分布関数を定義し、式3によって決定する。

$$\begin{aligned} h^+ \cdot dL &= \text{const.} \\ h^- &= \text{const.} \\ p &= 0.5 + C \cdot H(r) \\ & \quad (C \text{ は樹の一辺の長さ}) \end{aligned} \quad (\text{式 3})$$

初期の状態においては、 $p=0.5$ であり、観測が行われる毎に、観測点の位置決めが行われ、全体地図と局所地図の対応する樹の $p$ を適当な方法で足し合わせるにより、全体地図を更新する。

## 3. 移動パラメータの決定

$n$  個の観測点で得られた局所地図を、 $L_1 \sim L_n$  と書き表わす。 $L_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) は観測点を原点として格子上で表現されている。また、これらを融合して得られた全体地図を  $G_n$  とする。各観測点の位置を  $O_1 \sim O_n$  とし、これらの  $G_n$  内での位置はすでに決定されている。いま、 $n+1$  回目の観測が行われたとき、 $O_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) から  $O_{n+1}$  への運動パラメータを決定することにより、 $G_n$  内での観測点の位置、 $O_{n+1}$  が得られる。ロボットは水平な床面上を移動するため、運動パラメータは、ロボット自身の回転および水平面内の並進成分を求めればよい。

本論文では、ロボット運動の並進成分を移動方向と移動距離に分解し、ロボットの回転成分と移動方向を、 $O_i, O_{n+1}$  で得られる全方位画像間のFOEを利用して求める。これらのパラメータを決定することにより、 $O_{n+1}$  の位置は  $O_i$  を通る直線上に限定される。この直線上での  $O_{n+1}$  の候補  $O'_{n+1}$  を生成し、 $G_n$  の  $O'_{n+1}$  と  $L$  の原点を重ねあわせて2つの地図のマッチングをとる。可能な全ての  $O'_{n+1}$  のうち最適なものを選ぶことにより  $O_{n+1}$  の  $G_n$  上での位置を求める。

内界センサの場合も2点間の運動パラメータを

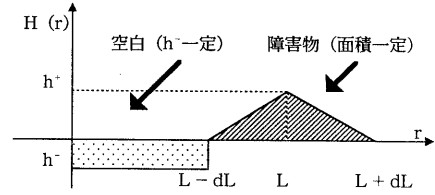


図5 確率分布関数  $H(r)$

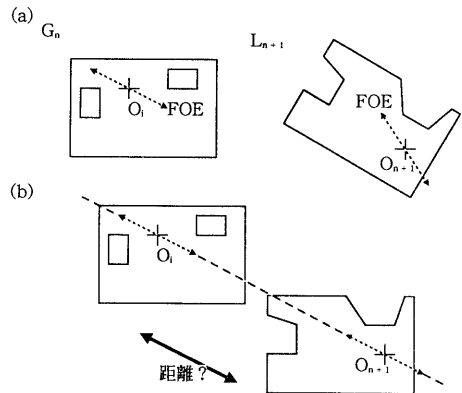


図6 FOEと観測点の相対位置

用いているが、この場合は、実際に移動した経路の両端の観測点についてしか運動パラメータが求まらない。従って誤差は累積する一方であるが、我々の方法は、経路の両端以外の2点についても適用でき、複数の観測点の組を用いることで、より正確に観測点の位置決めが行える。

### 3.1 FOEの発見

互いに観測可能な2つの観測点で得られた全方位画像中の特徴点の対応を取るにより、FOEを定義することができる。全方位画像中には2つのFOEがあらわれ、それらの間隔は常に $180^\circ$ となる。また、FOE付近の特徴点の運動視差は小さくなる。

従って、一方の全方位画像中で $180^\circ$ 離れた特徴点の組  $(f_{11}, f_{12})$  を任意にとるとき、それがFOEに一致するならば、もう一方の全方位画像中で対応する特徴点の組  $(f_{21}, f_{22})$  は $180^\circ$ の間隔を保つ。FOEに一致しない場合、 $(f_{21}, f_{22})$  の間隔は運動視差があるため $180^\circ$ にならない。このことを利用してFOEを発見することができる。

FOEが求められると、それぞれの観測点でロ

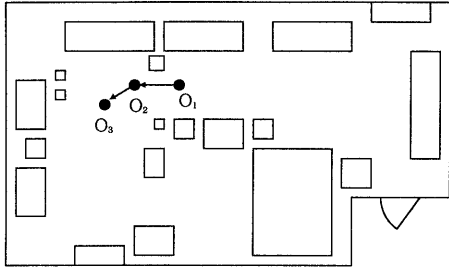


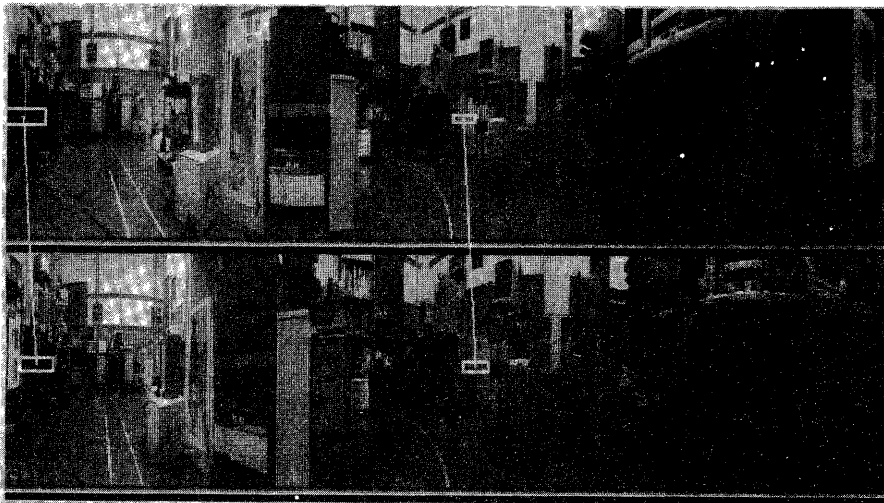
図7 実験環境の概要

ボットの移動方向は図6 (a) のようになる。したがって、2つの観測点の位置関係を図6 (b) のように、一本の直線上に限定することができる。

実際にFOEを計算する上では、上記のように各々の特徴点を独立に対応づけようとすると、特徴量の少ない部分では対応付けに失敗する可能性がある。従って以下のような方法を用いて、FOEを計算する。

それぞれの全方位画像中で、 $180^\circ$ の間隔を持つ特徴点の組  $(f_{11}, f_{12})$  および  $(f_{21}, f_{22})$  に対し、各特徴点を含むウィンドウ  $(w_{11}, w_{12})$ 、 $(w_{21},$

(a)



(b)

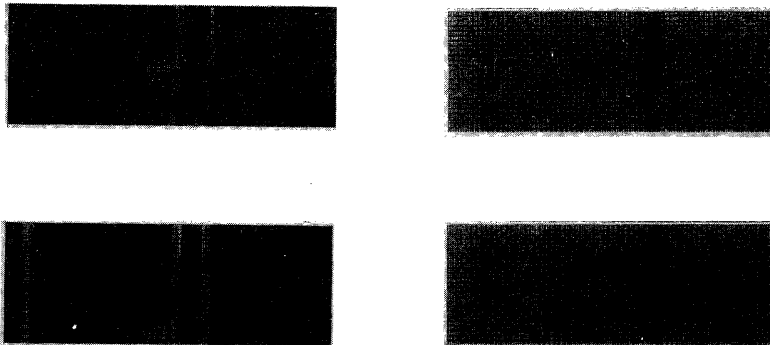


図8 FOEの計算

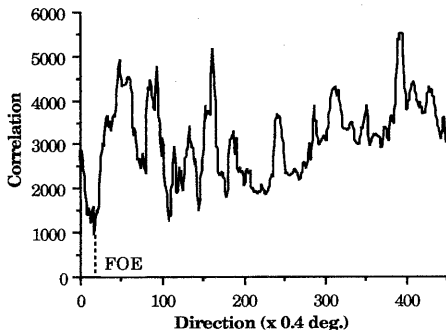


図9 FOEの探索と相関値の変化

$w_{22}$ )を設定し、全ての特徴点の組み合わせについて、相関を計算する。SSDAを用いて相関値の最も小さい特徴点の組み合わせを決定し、FOEを求める。

実際の計算上でのもう一つの問題は、2つの全方位画像の撮像地点が異なるため、全方位画像中に現れる特徴点の大きさが同じにならないことである。しかし、単眼全方位ステレオによって既に特徴点までの距離が分かっているため、これを用いて、式4によりウィンドウの大きさの正規化を行う

$$\begin{cases} z = z_{\max} & W_x = W_{x\max} & W_y = W_{y\max} \\ z_{\min} < z < z_{\max} & W_x = W_{x0}/z & W_y = W_{y0}/z \\ z_{\max} < z & W_x = W_{x\min} & W_y = W_{y\min} \end{cases} \quad (\text{式 4})$$

( $W_x, W_y$ は相関窓の大きさ、 $z$ は特徴点までの距離)

### 実験結果

図7に示す環境内の3つの観測点で全方位画像を撮像し、 $O_2$ 及び $O_3$ で得られた全方位画像2・

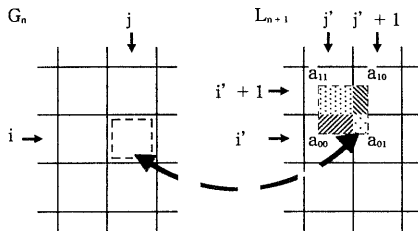


図10 樹の重なり

全方位画像3を用いてFOEの計算を行った。

図8(a)は全方位画像2・3と前記のアルゴリズムによって求められたFOEの位置を示す。2つの全方位画像間を結ぶ直線はそれぞれのFOEの対応をあらわす。

各々のFOEの周りに書かれた長方形は特徴点の対応をとるために用いたウィンドウの大きさを示し、図8(b)にそれぞれのウィンドウに含まれる画像を正規化したものを示す。物体までの距離に応じてウィンドウの大きさを変化させることにより、物体の大きさが正規化されていることが分かる。

図9は全方位画像2・3を用いてFOEを計算したときの、評価関数のグラフである。 $O_2$ で得られた全方位画像内の特徴点对の位置を横軸に取り、全方位画像3内の特徴点对との相関の最小値をプロットしたものである。

### 3.2 観測点間の距離の計算

2.4.1のようにしてFOEが求まると、2つの観測点間の位置関係は図6(b)のように一直線上に限定される。従って、この直線上で全体地図と局所地図が最もうまく重なるように観測点間の距離を決めることにより、2つの観測点の位置関係を求めることができる。

新しい観測点 $O_{n+1}$ と $G_n$ 内で位置決めされた観測点 $O_i$  ( $1 \leq i \leq n$ )について、それぞれの観測点で撮像された全方位画像から求められたFOEにより、 $G_n$ に対する $L_{n-1}$ の回転角度は補正され、格子による表現に変換されているものとする。このとき、 $G_n$ における $O_{n+1}$ は $O_i$ を通る直線上にあることが分かるので、直線上の適当な一点を $O_{n+1}$ の仮説 $O'_{n+1}$ とする。 $G_n$ 上の $O'_{n+1}$ と $L_{n-1}$ の原点が一致するように2つの地図を重ねあわせ、対応する樹の類似度の総和をとることにより、仮説 $O'_{n+1}$ の評価値が求められる。

2つの地図を重ねあわせたとき、図10のように $G_n$ の $(i, j)$ の樹は、 $L_{n-1}$ の $(i', j')$ 、 $(i', j'+1)$ 、 $(i'+1, j')$ 、 $(i'+1, j'+1)$ の4つの樹と重なる。それぞれの樹の重なった部分の面積を $a_{00}, a_{01}, a_{10}, a_{11}$ とすると、樹の類似度は式5、6によって表わされる。

$$E_{ij} = -q_G(i,j) \cdot \{a_{00}q_L(i',j') + a_{01}q_L(i',j'+1) + a_{10}q_L(i'+1,j') + a_{11}q_L(i'+1,j'+1)\} \quad (\text{式 } 5)$$

$$q(i,j) = \begin{cases} k' \cdot (p(i,j) - P_{\text{unk}}) & p(i,j) \geq P_{\text{unk}} \\ k \cdot (p(i,j) - P_{\text{unk}}) & p(i,j) < P_{\text{unk}} \end{cases} \quad (\text{式 } 6)$$

(添字 G, L はそれぞれ全体地図、局所地図を表わす)

$E_{ij}$  は2つの地図の対応する樹の表わすものが、同じである場合に負の値をとり、異なる場合に正の値を取る。したがって、 $E_{ij}$  が小さいほど2つの樹がうまく重なるといえる。また、一般に、地図中では自由領域を示す樹の数が、障害物を示す樹の数よりもはるかに多いため、式6により、障害物同士の重なりを大きく評価する。

また、仮説  $O'_{n+1}$  の評価値は式7により計算される。

$$E_{\text{match}} = \sum \sum E_{ij} \quad (\text{式 } 7)$$

全ての  $O'_{n+1}$  のうち、最も  $E_{\text{match}}$  が小さくなるものを  $O_{n+1}$  とすることにより、新たな観測点の位置決めが行われる。

### 3.5 地図の融合

上記の手順により決定された  $G_n$  上の  $O_{n+1}$  と、 $L_{n+1}$  の原点を重ねあわせ、対応する樹の  $p$  をベイズの定理を用いて足しあわせることにより  $G_n$  と  $L_{n+1}$  は融合され、 $G_{n+1}$  が生成される。

実際の計算上は、式4と同様に、 $G_n$  の1つの樹の状態  $p(i,j)$  に対して、 $L_{n+1}$  の4つの樹の状態の加重和  $p'$  を考え、式8により  $p(i,j)$  を更新する。

$$p(i,j) \leftarrow \frac{p(i,j) \cdot p'}{p(i,j) \cdot p' + (1 - p(i,j)) \cdot (1 - p')} \quad (\text{式 } 8)$$

### 実験結果

図7に示された環境内において、観測点1と2、および観測点2と3の位置関係を計算した。ここで、FOEは既に決定されているものとする。

観測点1の局所地図を  $G_1$  として、観測点2・3の順に距離の計算および局所地図の融合を行った。また、観測点3を  $G_1$  として、観測点2・1の

順で同様のことを行った。表2.1に実際の距離と計算結果を示す。

また、観測点1-2間の距離  $D$  を横軸に取り、仮説  $O'_{n+1}$  の評価値  $E_{\text{match}}$  の変化をプロットしたものを、図11に示す。

図7に示された環境内において、各経路の運動パラメータを計算し3つの局所地図の融合を行った。

図12(a)は観測点1における局所地図を、格子に分割したものである。図12(b)は3つの局所地図を融合した結果である。

融合により、観測点1からは観測できない情報が得られている。また、観測点2・3の周囲の情報精度が改善されていることが分かる。

### 4. おわりに

全方位画像のFOEと、局所地図のマッチングを用いて、パノラマ表現に含まれる情報のみで、ロボットの位置決めが行える事を示した。

この方法は、観測点において得られる情報のみを利用するため、自由度の高い方法である。

	観測点間の距離 (cm)	
	1↔2	2↔3
実際の距離	97.5	66.5
融合順1→2→3	74.4	63.1
融合順3→2→1	78.5	61.9

表1 位置決めの結果

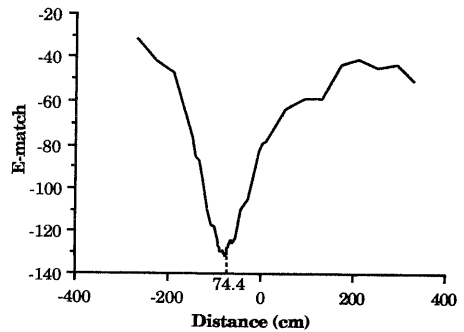


図11 仮説の評価値の変化

(a)

(b)

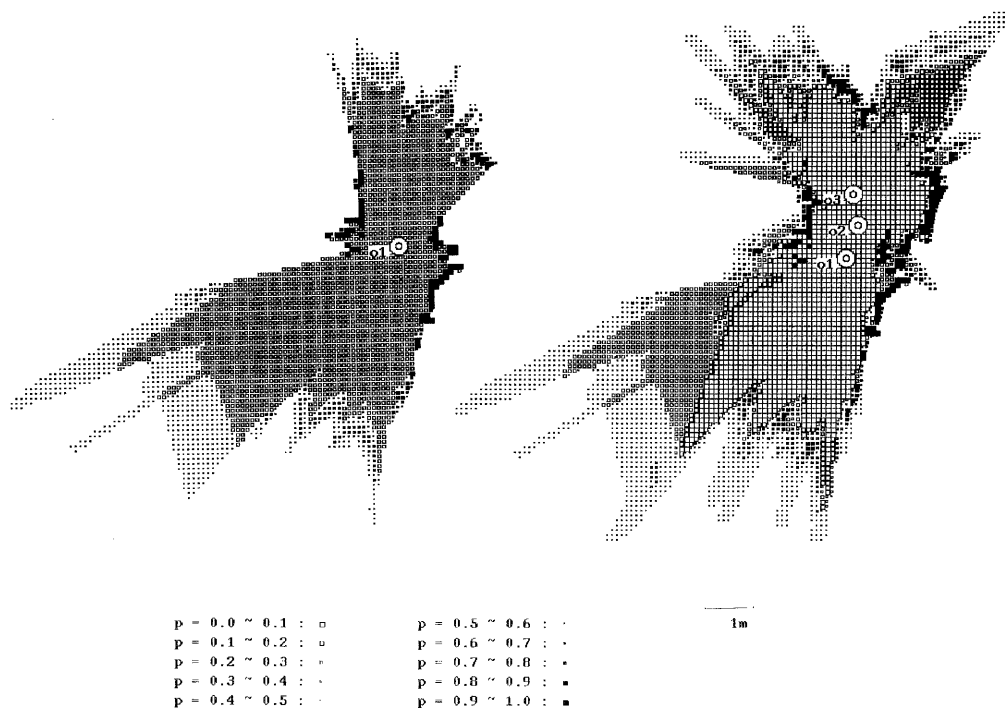


図12 地図の融合

本手法で用いるパノラマ表現は、非常に多くの情報を含むため、その獲得には非常に時間がかかる。今後、専用のハードウェアの開発や、アルゴリズムの改良による高速化が必要である。また、必要に応じ、環境の一部のみのパノラマ表現を獲得することも考える必要がある。

また、1箇所の位置決めを複数の基準点から行い、それらの結果を統合する事により、より正確な位置決めを行う方法についても検討する必要がある。

参考文献

1) N. Ayache and O. D. Faugeras, "Building, Resistrating and Fusing Noisy Visual Maps", Proc. 1st. Int. Conf. Computer Vision, pp. 73-82, 1987.

2) 浅田稔, "センサ情報の統合と理解による移動ロボットのための世界モデルの構築", 日本ロボ

ット学会誌, Vol.8, No.2, pp.28-38, 1990.

3) 石黒浩, 山本雅史, 辻三郎, "能動的全方位視覚を用いた環境構造の復元", 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.5, pp.541-550, 1991.

4) L. Matthies and A. Elfes, "Integration of Sonar and Stereo Range Data Using a Grid-Based Representation", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.727-733, 1988.

5) 植田健治, 石黒浩, 辻三郎, "全方位の視覚情報を含むパノラマ表現", 第9回日本ロボット学会予稿集, 1991.